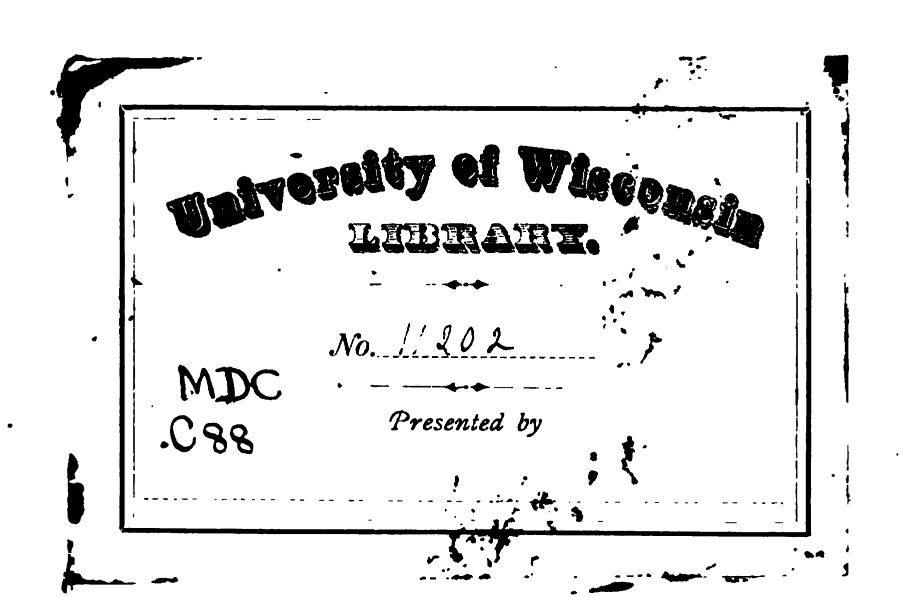

University of Wisconsin
LIBRARY.
No. 11202
MDC
.C88
Presented by

MESURE DE L'INTENSITÉ CALORIFIQUE

DES

RADIATIONS SOLAIRES

ET

DE LEUR ABSORPTION PAR L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE.

Extrait des Mémoires de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier
(Section des Sciences, 1876.)

Montpellier. — Typogr. Boehm et Fils.

MESURE DE L'INTENSITÉ CALORIFIQUE

DES

RADIATIONS SOLAIRES

ET

DE LEUR ABSORPTION PAR L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

PAR

André Prosper Paul

M. A. CROVA

Professeur à la Faculté des Sciences de Montpellier.

PARIS

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER

Quai des Augustins, 55

1876

MESURE DE L'INTENSITÉ CALORIFIQUE

DES

RADIATIONS SOLAIRES

ET

DE LEUR ABSORPTION PAR L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE.

L'étude de l'intensité calorifique des radiations solaires et de leur transmissibilité à travers notre atmosphère est une de celles qui intéressent le plus directement la Physique du globe, et qui peuvent fournir les indications les plus utiles à la Météorologie et à la Climatologie de chaque contrée.

D'une part, en effet, la partie des radiations solaires qui, arrivant à la surface du sol, est absorbée et pénètre plus ou moins profondément dans sa masse, influe d'une manière immédiate sur les phénomènes de la végétation et sur les mouvements de l'atmosphère, qui emprunte au sol une partie de la chaleur qui lui est ainsi communiquée. D'un autre côté, la partie de ces radiations qui est absorbée par l'atmosphère, principalement dans ses parties les plus basses, les plus denses et les plus riches en vapeur d'eau et en poussière de tout genre, influe d'une manière directe sur les variations atmosphériques qui sont accusées par le baromètre, le thermomètre, l'hygromètre, et sur les courants aériens.

La radiation solaire constitue donc le moteur universel de toutes les actions météorologiques, et l'on doit s'étonner, à juste titre, qu'une étude aussi

importante ait une si faible part dans les observations usuelles. Mais les études actinométriques exigent des manipulations délicates et des calculs qui ne sont abordables que par ceux qui en ont fait une étude spéciale ; de plus, il importe de mesurer l'intensité calorifique de la totalité des radiations qui arrivent à la surface du sol, et les instruments les plus répandus ne permettent que la mesure de la partie de ces radiations qui est transmise à travers une lame de verre dont la transparence est sujette à varier, et qui ne laisse arriver à l'instrument de mesure que la proportion variable de ces radiations qui est transmise à travers l'enveloppe vitreuse. Tels sont les actinomètres d'Herschell ou de Robinson, celui d'Ericsson et les thermomètres noir et brillant dans le vide d'Arago.

Le Pyrhéliomètre de Pouillet, convenablement modifié, et tous les autres instruments de construction analogue, recevant directement les rayons solaires, permettent des mesures absolues de la radiation totale, et conduisent à des résultats directement comparables entre eux. Mais, l'usage de ces instruments étant assez difficile, il serait utile que dans les principaux Observatoires des mesures précises puissent être entreprises dans ce sens.

Ces observations seraient comparables, et leur discussion conduirait à des résultats importants pour les études relatives à l'Astronomie, à la Physique du globe et à la Météorologie. En effet, l'intensité de la radiation solaire qui arrive à la surface de notre globe dépend d'un grand nombre de causes, parmi lesquelles nous pouvons distinguer :

1° Celles qui ont leur origine dans le soleil lui-même, c'est-à-dire la quantité variable de chaleur émise par les divers points de la surface solaire, et l'inégalité du pouvoir absorbant de son atmosphère pour les radiations qu'il émet. Ces deux causes pourraient faire varier l'intensité de la radiation émise par les deux hémisphères du disque solaire, comme l'a avancé le P. Secchi [1]; il est vrai que d'après les mesures plus récentes de M. Langley [2] et de M. Ericsson [3], les deux hémisphères du soleil enverraient exactement la

---

[1] P. Secchi; *Le Soleil*, 2e édit., tom. I, pag. 205.

[2] *Sur la température relative des diverses régions du soleil* (*Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXX, pag. 819 et 935).

[3] J. Ericsson: *Solar investigations*. — From Nature. — Vol. XII, october 14, 1875; et vol. XIII, december 9, 1875.

même chaleur, et que celle-ci serait symétriquement distribuée dans tous les sens sur sa surface à partir de son centre. De plus, le soleil pourrait être, comme le pense M. Buys-Ballot, une étoile variable, et nous envoyer des radiations dont l'intensité passerait par un maximum et un minimum dans une période de temps déterminée. L'inégale répartition des taches solaires et leur périodicité doit aussi influer notablement sur la chaleur émise par la surface du soleil. Cette question, non encore résolue, a été étudiée avec beaucoup de persévérance par plusieurs astronomes (W. Herschell, Schwabe, Wolf, etc.).

La détermination précise de la constante solaire, tentée par Pouillet, et qui dans l'état actuel de nos connaissances ne peut être déterminée qu'avec une approximation assez incertaine, permettrait d'étudier ces importantes questions. La mesure de cette constante devrait pour cela être répétée un grand nombre de fois et être l'objet de recherches continuées très-longtemps.

2° Les influences cosmiques, telles que l'affaiblissement de la radiation solaire, qui pourrait être due, soit à une absorption possible produite par le milieu interplanétaire, soit à l'interposition périodique entre la terre et le soleil de portion d'anneaux formés par des nuées d'astéroïdes. Cette hypothèse, à laquelle des observations du passage d'étoiles filantes faites dans ces derniers temps donne une grande probabilité, a été invoquée par plusieurs météorologistes pour expliquer des abaissements périodiques de température auxquels il paraissait impossible d'assigner une autre cause. Comme l'a fait remarquer M. Soret, de longues séries d'observations seraient nécessaires pour que l'on puisse éliminer par des moyennes l'influence variable et prépondérante qu'exerce l'atmosphère [1].

3° Enfin, les causes terrestres, telles que la distance variable de la terre au soleil, et l'absorption que l'atmosphère terrestre fait subir aux radiations solaires sur les divers points du globe, soit en raison de sa constitution variable, soit à cause de la masse atmosphérique qu'ils doivent traverser et qui est variable aux diverses heures d'une même journée et aux diverses

[1] Voir sur ce sujet le travail de M. E. Roche; *Recherches sur les offuscations du soleil et les météores cosmiques* (*Mémoires de l'Acad. des Sciences. et Lettres de Montpellier*, section des Sciences, tom. VII, pag. 9).

époques de l'année. Ces causes modifient puissamment les climats, en raison de l'inégale répartition de la vapeur d'eau et de l'influence prépondérante qui doit être attribuée aux vapeurs et aux poussières atmosphériques, d'après les travaux de M. Tyndall et de M. Soret.

L'étude de ces dernières causes nécessite des observations longtemps continuées sur les points où l'on veut étudier cette influence de l'atmosphère. Celle des deux premières exigerait des observations suivies sur des points choisis avec soin, à une altitude aussi grande que possible, sur lesquels les perturbations atmosphériques dues à des accidents locaux pourraient être négligées, et assez accessibles pour que des observations régulières puissent y être instituées.

Ce sont des études de ce genre que j'ai entreprises à Montpellier et sur divers points du département de l'Hérault ; mais avant d'exposer les résultats de mes recherches, je résumerai en peu de mots les principaux travaux qui ont été faits sur ce sujet ; la discussion des méthodes employées par les divers observateurs trouvera sa place dans la partie de ce travail qui traite des appareils et de la méthode que j'ai adoptés dans mes propres recherches.

Le premier travail dans lequel l'étude de la transparence de l'atmosphère pour les rayons émis par le soleil et les autres astres ait été abordée d'une manière précise, a été publié en 1729 par Bouguer. Les travaux de Bouguer sur ce sujet sont résumés dans l'ouvrage qui parut après sa mort, en 1760, sous le titre : *Traité d'Optique sur la gradation de la lumière*.

Quoique Bouguer ait limité ses études à l'absorption des rayons lumineux, il n'existe pas moins une liaison intime entre ces travaux et ceux qui furent entrepris plus tard par d'autres physiciens sur l'absorption des radiations calorifiques dans leur passage à travers notre atmosphère. En effet, il formula le premier la loi logarithmique de l'absorption atmosphérique, et mesura par sa méthode photométrique l'intensité de la lumière de la lune correspondant aux diverses hauteurs de cet astre au-dessus de l'horizon. Enfin, il a donné une méthode analytique rigoureuse qui permet de déterminer la masse d'air traversée par les rayons lumineux en fonction de la distance zénithale de l'astre qui nous les envoie. Il arriva à cette conclusion

que la transmission verticale à travers l'atmosphère laisse en moyenne parvenir à la surface du sol 0,8123 de la lumière incidente.

Lambert, dans sa *Photométrie*, publiée aussi en 1760[1], donna des mesures de l'intensité de la radiation solaire obtenue en prenant la différence des températures indiquées par deux thermomètres dont l'un était exposé au soleil et l'autre placé à l'ombre. Il calcula les épaisseurs atmosphériques traversées par les rayons solaires, et en déduisit l'absorption produite par l'atmosphère; il arriva ainsi à ce résultat, que la lumière transmise verticalement est 0,5889 de la lumière incidente aux limites de l'atmosphère, c'est-à-dire un peu moins que les 3/5. Bouguer avait trouvé plus des 4/5.

En 1774, de Saussure[2] fit sur des mesures comparatives au sommet du Cramont, à 2735^{m} au-dessus du niveau de la mer, et à Courmayeur, au pied de la montagne, à 1495^{m} d'altitude, au moyen de son héliothermomètre. Cet instrument se compose d'une boîte en bois doublée intérieurement d'une épaisse couche de liége noirci et fermée antérieurement par trois glaces bien transparentes et distantes l'une de l'autre d'un pouce et demi. Les rayons solaires tombant sur ces glaces pénétraient dans la boîte, où ils étaient absorbés par la surface noircie du liége; ainsi transformés en chaleur obscure, ils ne pouvaient traverser les glaces pour s'échapper au dehors, puisque le verre est athermane pour les radiations obscures. Un thermomètre placé dans la boîte indiquait alors une température assez élevée dont la comparaison avec la température de l'air servait à mesurer l'intensité de la radiation. De Saussure put ainsi constater ce résultat important, que l'intensité calorifique des radiations solaires était plus considérable à la station la plus élevée, quoique la température de l'air y fût beaucoup plus basse qu'à la station inférieure. D'autres mesures faites sur divers points des Alpes confirmèrent l'exactitude de ce fait, qu'il expliqua, comme Bouguer[3], par la plus grande transparence de l'air à de grandes altitudes. Mais il est évident que la nature même de l'instrument dont il s'est servi exclut toute possibilité de mesures précises.

---

[1] Lambert; *Photometria, sive de mensurâ et gradibus luminis, colorum et umbræ*. August. Vindelicorum, 1876. — On trouve une analyse de cet ouvrage dans Montucla.

[2] De Saussure: *Voyages dans les Alpes*, tom. II, pag. 294, 315 et 494, 497.

[3] Bouguer; *Voyages au Pérou*, pag. 51.

— J. Leslie, dans son *Essai sur la chaleur*[1], proposa dans le même but l'usage de son thermomètre différentiel, dont l'une des boules était noircie et l'autre brillante; mais la différence de température des deux boules, lorsque l'instrument exposé au soleil est arrivé à un état stationnaire, ne peut servir de mesure à la radiation, car, en admettant que celle-ci soit complétement absorbée par la boule noire, la boule brillante en absorbe aussi une portion variable avec la composition des radiations incidentes, qui est elle-même variable avec l'absorption qu'elles ont déjà subie dans leur passage à travers l'atmosphère; il serait aussi nécessaire de tenir compte du refroidissement inégal des deux boules par le rayonnement et par le contact de l'air.

En mesurant au moyen de cet instrument l'intensité de la radiation solaire à diverses heures d'une même journée, il trouva qu'à Édimbourg, par un beau temps, l'absorption atmosphérique arrête un quart des rayons qui seraient transmis sous une incidence verticale; mais Kæmtz, dans sa *Météorologie*, fait remarquer que cet instrument accuse à la fois l'effet de la radiation directe du soleil et celui des rayons réfléchis par l'atmosphère. Kæmtz, en mesurant la radiation due à la seule influence du soleil, et en se servant de la formule de Bouguer, trouva qu'au sommet du Faulhorn l'absorption de la radiation solaire transmise sous une incidence verticale est de 30 pour cent[2].

Les observations dont nous avons parlé jusqu'ici n'ont à peu près qu'un intérêt historique; elles ne donnent que des rapports de radiation, et les méthodes au moyen desquelles elles ont été obtenues sont d'une exactitude très-contestable. Il n'en est pas de même de celles qui furent faites presqu'à la même époque par Pouillet à Paris, et par John Herschell au cap de Bonne-Espérance. Jusqu'alors on avait exclusivement suivi la méthode des températures stationnaires ou *statique*, tandis qu'Herschell et Pouillet firent usage de la méthode *dynamique*, qui consiste à observer le réchauffement de l'instrument au soleil pendant un temps déterminé, et à le corriger des refroidissements observés à l'ombre avant et après l'exposition au soleil. L'actinomètre d'Herschell[3] se compose d'un thermomètre dont le réservoir

---

[1] Publié à Londres en 1814.

[2] Kæmtz; *Lehrbuch der Meteorol.*, tom. III, pag. 14.

[3] *The Edimburgh Journal of Science*, 1825, tom. III, pag. 107.

cylindrique, rempli d'une solution bleue de sulfate de cuivre ammoniacal, est muni dans le sens de son axe d'un piston plongeur que l'on peut enfoncer ou retirer à volonté au moyen d'une vis. On peut ainsi, tout en donnant à l'instrument une grande sensibilité, régler la colonne thermométrique, de manière qu'à chaque observation elle ne dépasse pas les limites de la graduation. Ce thermomètre est enfermé dans une boîte en bois noircie intérieurement et fermée par une glace. On l'expose à l'ombre derrière un écran et l'on note sa marche pendant une minute, puis son réchauffement pendant une minute au soleil, enfin son refroidissement pendant une minute à l'ombre. Les degrés de cet actinomètre étant arbitraires, Herschell a proposé de les convertir en *actines*. L'actine représente l'intensité de la radiation solaire qui, tombant normalement sur une couche de glace, en fondrait, si elle était complétement absorbée, une épaisseur de un millième de millimètre par minute de temps solaire moyen[1].

L'instrument d'Herschell a les défauts de celui de Saussure, dont il n'est qu'un perfectionnement. Il n'en est pas de même de celui dont Pouillet s'est servi dans ses recherches.

Pouillet fit d'abord usage d'un héliothermomètre[2] composé d'un thermomètre dont le réservoir était placé au centre d'une enceinte maintenue à la température de zéro; les rayons solaires arrivaient à sa surface par une ouverture convenable pratiquée dans la paroi de l'enceinte. Mais il l'abandonna bientôt pour faire usage de deux autres instruments[3]. L'un, qu'il nomma pyrhéliomètre direct, est certainement le plus précis dont on ait fait usage dans ce genre d'études, et il suffit de lui apporter quelques modifications dont nous parlerons plus loin, pour en faire un excellent instrument d'observation donnant en calories l'intensité de la radiation solaire.

Il se compose d'une boîte cylindrique en argent, pleine d'eau, dans laquelle plonge un thermomètre, et dont la base circulaire est noircie et exposée normalement aux rayons solaires. En retranchant du réchauffement observé la moyenne des refroidissements observés à l'ombre avant et après

---

[1] *Royal Society's Instructions*, pag. 58 et 65. — *The Admiralty Manual of scientific enquiry*. London, 1849, pag. 287.

[2] Pouillet; *Traité de Phys.*, 1re et 2e édit.

[3] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. VII, pag. 24. 1838.

l'exposition au soleil, on obtient l'élévation de température corrigée du refroidissement. On la multiplie par la valeur en eau du pyrhéliomètre pour obtenir le nombre de calories reçues sur la base circulaire de l'instrument pendant le temps de l'exposition au soleil. Pouillet calcula ses observations au moyen de la loi logarithmique de Bouguer, qu'il représenta par la formule :

$$t = A\ p^{\varepsilon}$$

dans laquelle t représente l'élévation de température du pyrhéliomètre, A la constante solaire, c'est-à-dire l'élévation de température que l'on observerait aux limites de l'atmosphère, p la proportion de chaleur transmise par l'atmosphère sous une incidence normale, et ε l'épaisseur atmosphérique traversée par les rayons solaires.

Il vérifia l'exactitude de cette formule en faisant usage de la formule de Lambert, pour calculer les épaisseurs atmosphériques transmises par les rayons solaires à diverses heures de la journée ; Pouillet trouva par cette méthode que la constante solaire est 1,763, c'est à-dire qu'aux limites de l'atmosphère, chaque centimètre carré exposé normalement aux rayons solaires reçoit par minute 1 calorie, 763, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever de un degré centigrade la température de 1 gramme d'eau.

J. Herschell avait déduit à peu près à la même époque, de ses expériences faites au cap de Bonne-Espérance, un nombre voisin de celui de celui-ci. Pouillet conclut aussi de ses recherches que la proportion de chaleur transmise par l'atmosphère dans une direction verticale peut varier de 0,72 à 0,78 selon les jours, le coefficient de transmission demeurant constant pendant une même journée. Nous verrons plus loin quelles sont les causes d'erreur qui affectent les résultats obtenus par Pouillet.

Pouillet se servit aussi d'un autre instrument, le pyrhéliomètre à lentille, qui se compose d'un calorimètre sur lequel une large lentille concentre les rayons solaires. Il proposait son usage dans les cas où l'on ne peut pas faire les expériences dans un air calme. Mais l'usage de cet instrument nécessite une correction relative à l'absorption exercée par le verre de la lentille.

MM. Bravais et Martins[1] ont fait usage de ce dernier instrument dans les expériences comparatives qu'ils firent en 1844 sur le grand plateau du mont Blanc, à 3930m au-dessus du niveau de la mer, et à Chamounix; la différence de niveau de ces deux stations est de 2890m. Les deux pyrhéliomètres, préalablement comparés avec soin, furent observés au même instant aux deux stations. Les résultats de leurs expériences les conduisirent à démontrer, comme de Saussure, mais au moyen de mesures beaucoup plus précises, que le rayonnement solaire est plus intense sur la montagne, quoique la température de l'air y fût de 22° plus basse que dans la vallée. M. Martins, discutant les mesures de la température du sol faites en 1842 par Peltier et Auguste Bravais au sommet du Faulhorn et celles qu'il a faites avec Bravais en 1844 sur ce même point, arrive aussi à conclure que l'échauffement relatif du sol est beaucoup plus considérable sur la montagne que dans la plaine, ce qui provient de l'intensité plus considérable de la radiation solaire à de grandes hauteurs.

Nous devons rapprocher de ces résultats les recherches faites en 1864 par M. Martins[2], sur l'échauffement au soleil de deux masses égales de terre de même nature exposées dans les mêmes conditions, l'une au sommet du Pic du Midi, à une hauteur de 2877m au-dessus de la mer, et l'autre à Bagnères; la différence de niveau des deux stations était de 2326m. L'excès thermique moyen du sol à 5 centimètres de profondeur fut, aux deux stations, dans le rapport de 10 à 22, c'est-à-dire plus du double sur la montagne que dans la plaine.

En 1842, J. Forbes[3] publia un travail considérable sur l'absorption que subissent les rayons solaires dans leur passage à travers l'atmosphère. En 1832, J. Herschell attira l'attention de J. Forbes sur l'importance qu'auraient

---

[1] *Des causes du froid sur les hautes montagnes (Annal. de chimie et de phys.*, 3e sér., tom. LVIII, pag. 210. 1860*)*. — Voir, pour le calcul des expériences : Bravais ; *Voyages en Scandinavie*; *Météorol.*, tom. III, pag. 337.

[2] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LIX, pag. 646.

[3] James Forbes; *On the Transparency of the Atmosphere. and the Law of Extinction of the Solar Rays in passing trough it (Backerian Lecture). Philosophical Transactions*, 1842, part. II, pag. 225.— Bibliothèque universelle de Genève, 1842, tom. LXI.—J. Forbes; *Notice of experiments on the diminution of intensity sustened by the sun's rays in passing through the atmosphere. (Edimb. Roy. Soc. Proceed.*, I, 1845, pag. 55-56*)*.

des observations actinométriques faites simultanément au sommet et à la base d'une haute montagne. Il lui confia deux de ses actinomètres qui furent comparés avec soin l'un et l'autre. Avec cet instrument, J. Forbes fit, en 1832, de très-nombreuses observations en Suisse sur divers points des Alpes. Les plus remarquables sont celles qu'il fit avec le concours de Kæmtz sur le sommet du Faulhorn et à Brienz; ces deux stations sont séparées par une couche d'air de 6800 pieds. Les observations simultanées faites en ces deux stations donnèrent lieu à trois genres de discussion :

1° Calcul de l'absorption déduite des observations de la station supérieure seule;

2° Même calcul d'après les observations de la station inférieure seule;

3° Déduction de la comparaison des deux séries d'observations, de l'absorption exercée par la couche comprise entre les deux stations.

Forbes conclut de ses expériences que l'absorption atmosphérique n'est pas constante dans une même journée, mais que le coefficient d'absorption des rayons transmis va en diminuant d'autant plus que la masse atmosphérique déjà traversée est plus grande. Il arrive aussi à conclure qu'après avoir traversé une masse infinie d'air atmosphérique, l'intensité des rayons transmis tendrait sur une valeur définie qui serait voisine du cinquième de leur intensité aux limites de l'atmosphère. D'après M. Forbes, l'absorption produite par l'atmosphère dans une transmission verticale réduirait la radiation incidente dans le rapport de 1 à 0,534.

Forbes attribue avec raison la variation du coefficient d'absorption à la non-homogénéité des radiations solaires qui se dépouillent, par leur transmission à travers l'atmosphère des radiations les plus absorbables deviennent d'autant plus riches en radiations plus transmissibles qu'elles ont traversé une plus grande masse atmosphérique. Il tient compte dans ses calculs de la masse de vapeur d'eau existant dans l'atmosphère, et attribue à sa présence une action prépondérante, devançant ainsi les travaux de Tyndall sur ce sujet. Il attribue une grande influence à l'état hygrométrique plutôt qu'à la tension absolue de la vapeur, et signale les anomalies qui proviennent du voisinage des deux stations d'altitude très-différentes et produites par les masses de vapeur qui du matin au soir se déplacent le long des montagnes. La seule inspection des courbes de ses observations permet de se rendre compte de cette

influence; c'est là le grand écueil qu'ont à redouter les observateurs qui font des expériences simultanées à deux altitudes très-différentes.

Enfin, Forbes donne pour valeur de la constante solaire 73 *actines*, ce qui donnerait 2,85 calories. Ce nombre, qui me paraît trop fort, est déduit du calcul de ses observations par la formule logarithmique dont il s'est servi et qui diffère, comme nous le verrons, de celle de Pouillet.

En terminant son travail, Forbes fait remarquer que la formule logarithmique de Pouillet n'a pu être vérifiée que par une sorte de compensation d'erreurs qui tient à ce que, pour calculer les épaisseurs atmosphériques, Pouillet s'est servi de la formule de Lambert; cette formule donne en effet des résultats affectés d'une erreur en moins, d'autant plus grande que la masse transmise est plus considérable.

Le Mémoire de M. Forbes est précédé d'un historique très-complet de la question; il contient des observations nombreuses et des développements importants. — Malheureusement, l'usage qu'il a fait de l'actinomètre d'Herschell pour ses déterminations ne permet pas de penser que les résultats numériques qu'il donne soient d'une grande exactitude.

M. Quételet[1], en discutant une série de douze années d'observations faites à l'Observatoire de Bruxelles au moyen de l'actinomètre d'Herschell, a constaté que les observations faites en hiver, lorsque le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon, accusent une absorption par l'atmosphère moindre que celles qui sont faites pendant l'été. Il attribue ces différences à une constitution de l'asmosphère variable selon les saisons, et aussi à l'inexactitude de la loi de Bouguer.

M. de Gasparin[2], dans ses expériences faites à Orange, se servit d'un actinomètre composé d'une boule de cuivre mince peinte au noir de fumée, de 18 cent. de diamètre, au centre de laquelle était la boule d'un thermomètre. Il fit usage de cet instrument pour mesurer la proportion de chaleur transmise par l'atmosphère : la *faculté d'accumulation* de la chaleur solaire dans son instrument était représentée par les nombres 5,736 à Versailles en

---

[1] *Annuaire Météorol. de la France pour 1850*, pag. 143 et suiv.

[2] De Gasparin; *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. XXXVI, pag. 974.

août 1852, de 2 à 3 heures ; 7,132 le même mois à Orange ; 13,267 au Grand Saint-Bernard, à une altitude de 2491 m. M. Haëghens fit la même année des expériences à Versailles au moyen de cet instrument. Mais, quelque intérêt que présentent ces recherches, on ne peut en déduire aucune mesure absolue de la radiation, ni comparer les résultats obtenus avec les indications des autres actinomètres.

En 1862 et 1863, Waterston[1], Ericsson[2], puis le P. Secchi[3], firent successivement usage d'actinomètres qui sont des améliorations de l'héliothermomètre de Saussure. Dans celui d'Ericsson, le réservoir du thermomètre se trouve au milieu d'une double enceinte dans laquelle on fait circuler un courant d'eau à température constante ; mais les rayons solaires arrivent sur le thermomètre par une petite ouverture munie d'une glace bien transparente, circonstance qui, en modifiant la composition des radiations transmises, ne permet pas leur évaluation rigoureuse en unités de chaleur ni même leur comparaison. Le P. Secchi a supprimé cette glace et admis librement les rayons solaires sur la boule thermométrique noircie ; avec un appareil ainsi modifié, il sera toujours possible de calculer le nombre d'unités de chaleur reçues dans l'unité de temps sur un centimètre carré, et de rendre ainsi les instruments comparables entre eux.

Le P. Secchi a constaté que la vapeur d'eau a une influence considérable dans l'absorption atmosphérique, et que, pour des hauteurs égales, la radiation du soleil est moindre en été qu'en hiver. Ces résultats confirment les recherches de M. Tyndall et de M. Garibaldi de Gênes sur le pouvoir absorbant de la vapeur d'eau, qui est moins abondante en hiver qu'en été.

M. Soret[4] a fait à Genève et sur divers points des Alpes de nombreuses

---

[1] John James Waterston; *On account of experiments on solar radiation.* (*Astron. Soc. Month. Not.*, XXIII (1862), pag. 60 et 67, et *Phil. Mag.*, XXIII, 1862, pag. 497, 511).

[2] J. Ericsson; *Nature* (Londres), tom. IV et V, et tom. XII, october 14, 1875.

[3] Secchi; *Bolettino del Oss. del Coll. Romano*, 1863, pag. 19.

[4] Soret; *Sur l'intensité de la radiation solaire* (*Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXV, pag. 526 (1867), et tom. LXVI, pag. 810 (1868).— *Compt. rend. de la première Session* (à Bordeaux) *de l'Associat. française pour l'avancement des Sciences*, en 1872, pag. 282.

déterminations d'intensités de la radiation solaire, au moyen d'un actinomètre analogue aux précédents, mais auquel il a apporté des modifications qui en rendent l'usage plus sûr et plus facile. Les rayons solaires sont directement reçus sur la boule du thermomètre noir ; quand les observations sont faites à des altitudes très-différentes, elles reçoivent une correction due à la vitesse inégale du refroidissement au contact de l'air, sous des pressions différentes. Enfin, en mesurant la transmissibilité des radiations à travers une couche d'eau d'épaisseur constante, à diverses époques de l'année, aux diverses heures de la journée, et à des altitudes variables, il a trouvé que la proportion de la radiation transmise par l'eau est d'autant plus grande que la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air est plus considérable. Il est intéressant de rapprocher ce résultat de ceux de Melloni et de Volpicelli, qui opérant, soit avec une lame d'eau, soit avec des lames de nature différente, ont constaté l'inégale transmissibilité des rayons solaires aux diverses heures de la journée.

M. Soret a trouvé qu'en hiver la radiation solaire est plus intense qu'en été, pour des hauteurs égales du soleil ; que la radiation est toujours plus forte par un temps sec que par un temps humide, quoique l'air paraisse plus transparent dans le second cas ; que pour des hauteurs égales du soleil, les minima de radiation correspondent aux maxima de tension de la vapeur d'eau.

M. Soret a fait aussi de nombreuses déterminations sur divers points des Alpes, et des observations comparées sur le sommet du mont Blanc et à Genève. Il a trouvé que la radiation au sommet du mont Blanc est à celle que l'on observe à la même heure (midi) à Genève, dans le rapport de 15,70 à 19,26. Il en a déduit des valeurs approchées de la constante solaire, en calculant ses observations au moyen d'une formule empirique. M. Soret a constaté aussi que la loi de Bouguer, exprimée par la formule de Pouillet, ne s'applique exactement ni aux observations faites dans la plaine, ni à celles qui sont faites sur les montagnes. Les nombreuses déterminations qu'il a faites dans des circonstances si variées seront directement comparables avec celles des autres actinomètres, dans lesquels les rayons solaires sont directement admis sur le thermomètre. Il suffira pour cela de connaître la valeur en eau des degrés de son actinomètre. Car,

comme le fait remarquer M. Soret, deux actinomètres de dimensions différentes donnent, dans les mêmes circonstances, des nombres différents ; il est donc nécessaire de les étalonner en exprimant leurs degrés en unités de chaleur.

M. Desains[1] a fait, en collaboration avec M. Branly, des recherches dans lesquelles il s'est proposé d'étudier l'influence qu'exercent sur l'intensité de la radiation solaire et sur la composition des rayons solaires reçus, les variations d'altitude, et, à une altitude déterminée, les variations de la hauteur du soleil, dans une même journée, la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air étant constante.

Il s'est servi d'un actinomètre très-sensible, composé d'une pile thermoélectrique montée parallactiquement de manière que son axe soit toujours dans la direction des rayons solaires. Les indications du galvanomètre qui reçoit le courant de la pile sont converties en unités de chaleur ; il suffit pour cela de comparer l'indication de l'actinomètre électrique à celle d'un autre actinomètre analogue à celui du P. Secchi.

Si l'on connaît la valeur en eau de la boule du thermomètre et sa section, il sera toujours possible de réduire les différences de température des deux thermomètres en unités de chaleur, si l'on a déterminé préalablement la formule empirique du refroidissement du thermomètre noir dans l'air de l'enceinte.

M. Desains a trouvé que la radiation solaire subit, en traversant sous un angle de 70° avec la verticale la couche d'air de 1450^{m} d'épaisseur comprise entre le sommet du Righi et le lac de Lucerne, une perte de 17,1 pour cent; que la transmissibilité des radiations à travers une couche d'eau d'épaisseur constante est d'autant plus grande qu'elles ont déjà traversé une plus grande masse d'air; que les radiations solaires sont aussi plus transmissibles à travers l'eau le matin que le soir, et que ces différences paraissent s'effacer en hiver.

---

[1] Desains et Branly; *Recherches sur le rayonnement solaire* (*Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXIX, pag. 1133 (1869). — Desains; *Étude des radiations solaires* (*Compt. rend.*, tom. LXXVIII, pag. 1455 (1874). — Desains; *Recherches sur les radiations solaires* (*Compt. rend.*, tom. LXXX, pag. 1470 (1875).



M. Desains fait remarquer qu'à cause de la difficulté d'obtenir des journées symétriques de part et d'autre du midi, et des variations de la quantité de vapeur contenues dans l'air, la formule de Pouillet ne peut conduire à une détermination précise de la constante solaire. Enfin, il donne les résultats des mesures absolues de radiation qu'il a faites à Paris pendant les années 1874 et 1875.

M. Desains ayant démontré que la vapeur d'eau exerce sur la chaleur rayonnante la même absorption qu'une égale masse d'eau à l'état liquide, on conçoit la possibilité de calculer, en évaluant par sa méthode l'affaiblissement que subit la radiation solaire en traversant une masse d'eau connue, la masse totale de vapeur d'eau répandue dans l'atmosphère au moment de l'expérience.

MM. Exner et Röntgen[1] se sont servis, pour mesurer l'intensité calorifique de la radiation solaire, d'un instrument construit sur le même principe que le calorimètre de glace de M. Bunsen. On a ainsi plus de précision, et moins de corrections à faire aux données de l'expérience. Les valeurs obtenues par l'emploi de cet instrument ont été supérieures à celles de Pouillet.

M. Marié-Davy[2] a institué à l'Observatoire de Montsouris des observations continues faites au moyen de l'actinomètre d'Arago, composé de deux thermomètres, l'un brillant, l'autre noirci, dont les réservoirs sont placés au centre de deux ballons dans lesquels on a fait le vide. La différence de température des deux thermomètres exposés au soleil est considérée comme proportionnelle à l'intensité des radiations, qui après avoir traversé le verre de l'enveloppe arrive aux thermomètres.

En Angleterre, on observe dans le même but le thermomètre d'Herschell[3], qui est un thermomètre à maxima dont la boule noircie est au centre d'un ballon vide d'air, afin de le soustraire à l'influence de l'agitation de l'air et

---

[1] *Sitzungsberichte der Math. Naturw. classe der K. Akademie der Wissenchaften in Wien*, 26 février 1871.

[2] *Bull. de l'Observat. Météorol. de Montsouris*, tom. II, pag. 80 (1873). et tom. III, pag. 133 et 189 (1874); et *Annuaire Météorol. de l'Observat. de Montsouris*, années 1874 et 1875.

[3] *Quarterly Journal of the Meteorological Society*. London, numéro d'avril 1874.

des radiations obscures qui, comme on le sait, traversent difficilement le verre. L'instrument est couché sur le gazon et observé tous les jours. Arago avait perfectionné cet instrument en lui joignant un autre thermomètre à boule nue placé aussi dans le vide, mais ces instruments restèrent longtemps sans emploi. Lors de l'organisation de l'Observatoire de Montsouris, M. Ch. Sainte Claire-Deville entreprit des observations régulières au moyen de ces instruments, et donna aux ballons qui entourent les thermomètres un diamètre de 10 centim. environ, afin de donner plus de régularité à l'échange de chaleur qui se fait entre le thermomètre chauffé par le rayonnement solaire et les parois plus froides du ballon. M. Marié-Davy a continué ces observations, mais il a fait usage de ballons plus petits, et a rendu tous les instruments comparables entre eux en réduisant leurs indications en degrés actinométriques.

Le P. Secchi[1] critique les instruments de ce genre; il fait remarquer que leur usage est sujet à des perturbations qu'il est difficile d'évaluer.

Mais il ne faut pas demander à ces instruments des mesures précises de l'intensité calorifique de la radiation solaire; ils fournissent, d'après M. Marié-Davy, le moyen le plus commode, sinon le plus précis, de mesurer l'éclairement du ciel aux diverses heures du jour et aux diverses époques de l'année.

M. Violle[2] s'est servi dans ses recherches d'un actinomètre analogue à celui du P. Secchi, mais il a donné à l'enceinte une forme sphérique et un assez grand diamètre. Il a calculé avec soin l'influence du refroidissement et celle du rayonnement qu'envoient sur la boule thermométrique les parties du ciel voisines du soleil. Il a fait des mesures d'intensité de la radiation solaire sur divers points des Alpes, et notamment des observations simultanées au sommet du mont Blanc à une altitude de 4,810^{m} et au glacier des Bossons à 1200^{m} d'altitude. Les indications de son actinomètre ont été réduites en unités de chaleur par la méthode qu'a employée M. Desains. Il a trouvé que l'intensité calorifique étant 2,392 au sommet du mont Blanc,

---

[1] *Compt. rend. des séances de l'Académie des Sc. de Paris*, tom. LXXIV, pag. 26.

[2] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXVIII, pag. 1125 et 1816 (1874), et tom. LXXXII, pag. 729 et 896 (1876).

n'est que 2,022 au glacier des Bossons. Il déduit de ses observations la mesure de la constante solaire, qu'il a trouvée égale à 2,540.

Les recherches de M. Violle ont été faites dans le but d'obtenir une valeur approchée de la température du soleil. Pour cela, il a comparé l'intensité de la radiation solaire avec le rayonnement de plusieurs sources de chaleur à haute température.

Nous n'avons pas ici à entrer dans les discussions qui eurent lieu à la suite de la publication des idées du P. Secchi sur la température du soleil, des communications diverses qu'elle provoqua[1]. Nous ne nous occuperons donc pas de cette question: les différences énormes qui existent entre les nombres proposés par les divers physiciens qui s'en sont occupés, prouvent que ces recherches ne peuvent encore être abordées avec précision, et nous pensons, avec M. Soret, que, dans l'ignorance où nous sommes des lois du rayonnement à de hautes températures, il est prématuré de vouloir fixer avec quelque précision la température du soleil.

MÉTHODES D'OBSERVATION ET DE CALCUL ADOPTÉES DANS CES RECHERCHES.

Les mesures de la radiation solaire peuvent être faites dans des buts très-différents, et l'on a, selon les cas, employé diverses méthodes. On peut mesurer l'effet thermométrique produit par les radiations solaires sur des thermomètres brillants ou noircis, librement exposés au soleil ou protégés par une enveloppe de verre. Ce genre d'observations est surtout employé

[1] Secchi: *Sur la température solaire* (*Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXIV, pag. 26 et 301 (1870). — Vicaire; *Sur la température de la surface solaire* (*Compt. rend.*, tom. LXXIV, pag. 31 et 461 (1870). Observations sur la Note de M. Vicaire, par MM. Faye, Sainte Claire-Deville, E. Becquerel et Fizeau (*Compt. rend.*, tom. LXXIV, pag. 35-36). — H. Sainte Claire-Deville; *Sur la mesure des températures très-élevées, et sur la température du soleil* (*Compt. rend.*, tom. LXXIV, pag. 145). — Soret; Lettre à M. H. Sainte Claire-Deville *sur la température du soleil* (*Archiv. des Sc. phys.*, tom. LII, pag. 89 (février 1875). — Violle; *Sur la température du soleil.* Réponse à M. Soret (*Annal. de l'École Normale supérieure*, 2e sér., tom. IV (novembre 1875). — Réponse de M. Soret à la Note de M. Violle (*Archiv. de Genève*, tom. LV, pag. 217, février 1876).

par les météorologistes, mais il a l'inconvénient de donner des indications dont l'interprétation est difficile.

Quelle est en effet la part des radiations obscures, si abondantes dans les rayons solaires, dans le résultat observé? Le verre les transmet en partie, en absorbe plus qu'il n'en transmet; il laisse passer en majeure partie les radiations lumineuses, aussi a-t-on préconisé l'emploi de ces instruments comme photomètres. Mais la température stationnaire du thermomètre dépend aussi en partie de celle de l'enveloppe de verre, et celle-ci est influencée par le degré d'agitation de l'air, de sorte que les observations faites par les temps calmes ne sont pas comparables à celles qui sont faites par les vents violents. De plus, à cause des lois du refroidissement, une même différence de température des deux thermomètres ne représentera pas une égale intensité de la radiation, selon que la température extérieure sera plus ou moins élevée. Des corrections notables devront être apportées aux indications obtenues.

Une autre méthode moins directe consiste dans l'observation de la température du sol à diverses profondeurs, ou d'une masse de terre contenue dans une caisse de dimension déterminée. Le rayonnement solaire est absorbé par le sol, et la chaleur qui en résulte s'y propage suivant des lois qu'il est facile d'établir si le sol est homogène et si l'on en connaît la conductibilité. Ce genre d'observation peut rendre d'utiles services à la météorologie et à l'étude de la végétation, mais il ne saurait être employé dans le but d'obtenir des mesures, même approchées, de la radiation.

Une mesure absolue de l'intensité calorifique de la radiation solaire est une véritable opération calorimétrique complète; mais elle doit être faite dans un temps aussi court que possible, afin de réduire à leur plus petite valeur les perturbations causées par les variations de la température de l'air et le refroidissement produit par son agitation variable, et aussi afin que l'on puisse considérer la hauteur du soleil comme constante pendant la durée de l'expérience.

1° On peut mesurer l'élévation de température d'une masse, d'un corps dont on connaît la valeur en eau, et dont une partie de la surface, recouverte d'un enduit doué d'un pouvoir absorbant maximum, reçoit normalement les rayons solaires. Cette élévation de température corrigée du refroidissement

donnera en calories la valeur de l'intensité calorifique de la radiation. C'est la méthode du pyrhéliomètre de Pouillet; c'est celle qui se rapproche le plus des méthodes rigoureuses employées en physique pour les opérations de calorimétrie. On lui a donné le nom de méthode *dynamique*, par opposition à la suivante, dans laquelle on n'observe que des températures stationnaires.

2° La méthode *statique* consiste à observer la température stationnaire qu'atteint, sous l'influence des rayons solaires, un thermomètre dont le réservoir sphérique est placé dans une enceinte dont la température est entretenue constante. L'équilibre de température s'établit quand la chaleur absorbée dans l'unité de temps par la surface noire de la boule thermométrique est égale à celle qu'elle perd dans le même temps par le rayonnement et par le contact de l'air. Les formules de Dulong et Petit ne peuvent pas être toujours appliquées au calcul du refroidissement dans ces instruments, car elles ne s'appliquent qu'aux circonstances dans lesquelles elles ont été établies, et doivent être quelquefois modifiées selon la forme et les dimensions de l'enceinte. De plus, les excès thermométriques étant toujours peu considérables, elles peuvent être simplifiées sans perdre de leur précision. Chaque observateur devra donc étudier dans son instrument les lois du refroidissement de son thermomètre, et, s'il doit opérer à de grandes altitudes, étudier l'influence des variations de pression dans les limites de ses expériences.

M. Soret[1] a discuté les avantages et les inconvénients de ces deux méthodes, et a adopté dans ses recherches la méthode statique. Cette méthode a en effet l'avantage de donner des observations continues et de n'exiger qu'une lecture, mais je ne crois pas qu'elle puisse être exclusivement employée. Dans bien des cas, lorsque par exemple la durée de l'observation est limitée ou que le soleil subit des variations rapides d'éclat, ce qui arrive toujours quand il est voisin de l'horizon, la méthode dynamique s'impose à l'observateur. La méthode statique trouvera son application principalement dans les observations météorologiques. Elle est très-pratique ; et si on ne lui demande que des observations à des heures déterminées, pourvu qu'elles

---

[1] *Recherches sur l'intensité calorifique des radiations solaires* (*Compt. rend. de la session, à Bordeaux, de l'Association française pour l'avancement des Sciences* (1872), pag. 282.

soient assez éloignées du lever et du coucher du soleil, on pourra compter sur une grande précision, car on pourra, au moyen de formules convenables, tenir compte de toutes les influences perturbatrices, et obtenir des mesures absolues de l'intensité de la radiation.

Mais, pour arriver à ce dernier résultat, il faudra convertir les indications de l'instrument en unités de chaleur. Pour cela, on peut employer deux méthodes.

L'une consiste, comme nous l'avons déjà dit, à mesurer la valeur en eau du thermomètre noirci et la section de sa boule, et d'en déduire, par l'emploi des formules du refroidissement dans l'air, la quantité de chaleur que perd cette boule dans l'unité de temps ; elle est égale à celle qu'elle reçoit du soleil, puisque l'état stationnaire de température était obtenu au moment de l'observation.

Je préfère observer au même instant l'actinomètre que je veux ainsi étalonner et un pyrhéliomètre de Pouillet donnant directement la quantité de chaleur reçue sur l'unité de surface exposée normalement aux rayons solaires. Si l'observation est faite à midi, par un ciel très-pur et par un temps calme, la comparaison des deux instruments sera rigoureuse, car dans ces conditions la radiation solaire est constante pendant un temps considérable, puisque la hauteur du soleil ne varie presque pas; de plus, par un temps calme, on peut calculer avec précision le refroidissement de l'instrument et obtenir des nombres exacts.

Je trouve à cette méthode les avantages suivants.

En premier lieu, la surface de la base du pyrhéliomètre de Pouillet est un cercle de 10 centimètres de diamètre, dont la surface peut être évaluée avec une grande précision si la base de la boîte est bien plane et ses arêtes bien vives. La mesure de la section de la boule d'un thermomètre peut au contraire comporter une erreur relative assez notable, car la boule n'est jamais sphérique, et ses dimensions sont si petites qu'une erreur absolue très-faible peut donner une erreur relative considérable. En second lieu, il me paraît extrêmement difficile de calculer avec beaucoup de précision la valeur en eau de la boule. Celle-ci, en effet, fait corps avec la tige, et il est impossible que dans l'évaluation de sa valeur en eau une partie de la chaleur absorbée par la portion de la tige voisine du réservoir ne vienne pas

troubler les résultats; de plus, pendant l'échauffement de la boule au soleil, une partie de la chaleur absorbée doit nécessairement s'écouler par la tige par conductibilité, et la valeur en eau de la partie de l'instrument qui reçoit réellement la chaleur est plus grande que celle que l'on a calculée.

Dans ses travaux précédemment cités, M. Soret a insisté sur l'influence perturbatrice de la tige du thermomètre, et a montré qu'elle n'est pas négligeable.

Dans l'impossibilité où nous sommes de tenir compte de cette influence, et à cause des erreurs auxquelles on est exposé, je préfère étalonner mes actinomètres en les comparant avec un pyrhéliomètre de Pouillet convenablement modifié. M. Soret signale d'autres inconvénients de la méthode dynamique, tels que le temps considérable qu'exige l'instrument pour atteindre la température stationnaire, et son défaut de sensibilité aux variations rapides de la radiation.

La méthode dynamique a aussi ses inconvénients, et l'un des plus graves a été signalé par M. Soret. On ne peut pas admettre, en effet, que le refroidissement que subit l'instrument par le rayonnement et le contact de l'air, pendant la durée de son exposition au soleil, soit exactement la moyenne des refroidissements observés à l'ombre avant et après son échauffement au soleil. La température de la face noire qui absorbe la chaleur doit être un peu supérieure à celle de la masse de l'instrument, pour qu'un flux de chaleur pénètre du dehors en dedans; de même, quand l'instrument se refroidit, la face noire rayonne plus de chaleur que les autres parties de l'instrument et se refroidit davantage.

Cette cause d'erreur est réelle, mais elle est très-faible; je me suis proposé de la réduire à sa plus petite valeur possible, en donnant à la masse de l'instrument une conductibilité pour la chaleur aussi grande que possible. Il suffit pour cela d'employer le mercure comme liquide calorimétrique à la place de l'eau, comme l'a fait M. Tyndall; si en effet la conductibilité de la partie qui s'échauffe par l'absorption des rayons solaires était infiniment grande, l'échange de chaleur du dehors au dedans, ou l'échange inverse se feraient sous l'influence de différences de température tellement faibles qu'il serait difficile de les apprécier. Or, l'eau qui remplit la caisse du pyrhéliomètre de Pouillet transmet difficilement la

chaleur de la face noire de la boîte à sa masse totale ; l'agitation continuelle de la boîte pendant son exposition au soleil ne suffit pas pour que la chaleur se répartisse rapidement dans toute la masse. Je rappellerai à ce sujet les difficultés que Péclet[1] eut à surmonter dans ses recherches sur la conductibilité des métaux ; il constata que des erreurs très-notables étaient causées par l'adhérence au métal chauffé d'une couche d'eau très-mince qui, par sa mauvaise conductibilité, opposait un obstacle permanent à l'écoulement de la chaleur de la plaque de métal à la masse d'eau dont l'élévation de température devait servir de mesure à la chaleur transmise. Il ne put se mettre à l'abri de cette cause d'erreur qu'en adaptant contre la surface métallique des brosses qui, mises en mouvement par une manivelle pendant la durée de l'expérience, renouvelaient à chaque instant la couche d'eau en contact avec le métal.

Il est certain que cette cause d'erreur influe sur les résultats obtenus au moyen du pyrhéliomètre de Pouillet ; elle est encore aggravée par cette circonstance que l'agitation de la caisse de l'instrument s'effectue par une simple rotation autour de son axe. Or, il est difficile d'admettre que le mouvement de rotation de la boîte se communique à la masse d'eau intérieure, qui en vertu de son inertie glisse sur la boîte, sans se déplacer. Dans ces circonstances, l'influence de la couche d'eau adhérant au métal doit devenir considérable.

J'ai constaté en effet que ces causes d'erreur sont loin d'être négligeables. Dans ce but, je me suis servi de deux pyrhéliomètres de même construction, et je les ai observés conformément aux indications de Pouillet. Exposés au soleil à côté l'un de l'autre, ils marchaient à peu près d'accord, quoique j'aie constaté dans certains cas des différences difficiles à expliquer. J'ai aussi fait usage de deux pyrhéliomètres de Pouillet de construction différente : observés dans les mêmes circonstances, ils m'ont donné des différences encore plus notables. Souvent, après avoir lu le thermomètre, il suffisait de faire tourner d'une manière très-brusque et saccadée l'axe de l'instrument dans un sens et dans l'autre, pour voir le thermomètre remonter d'une fraction de degré, quoique l'instrument fût à l'ombre.

---

[1] *Annal. de chimie et de phys.*, 3e sér., tom. II.

L'instrument dont je me sers comme pyrhéliomètre étalon, et qui est destiné à étalonner les actinomètres que j'emploie pour mes observations courantes[1], est représenté par la *fig.* 1, Pl. I. Il se compose d'une boîte cylindrique d'acier formée de deux coquilles réunies à leur circonférence par des vis; elles joignent hermétiquement, si l'on prend soin de recouvrir les faces en contact d'un léger enduit de minium et d'huile de lin. Je me suis assuré que ces boîtes, qui ont été construites par M. Golaz avec le plus grand soin, tiennent pendant plusieurs jours le vide de la machine pneumatique à mercure. La base circulaire de la boîte a exactement 10 centimètres de diamètre, et sa face latérale, qui a la forme d'un cylindre parfait, en découpe nettement la base suivant une arête vive; elle est polie avec soin pour diminuer l'influence du rayonnement.

On la remplit de mercure; un thermomètre calorimétrique, construit par M. Baudin, est mastiqué dans une pièce en acier qui se visse sur l'orifice de la boîte et la ferme hermétiquement. Afin d'éviter la rupture possible de l'instrument par la dilatation du mercure, le bouchon qui porte le thermomètre n'a été vissé à fond qu'après que la température de la boîte pleine de mercure eût été élevée à 60° environ. Le réservoir du thermomètre est dans l'axe de la boîte, et l'axe de la tige est perpendiculaire à la base du cylindre; la tige est protégée par un manchon en verre mastiqué sur le bouchon. L'instrument est monté, comme le pyrhéliomètre de Pouillet, sur une tige métallique mobile à charnière dans tous les sens, et un écran en laiton noirci, placé à l'extrémité opposée de la tige, permet de recevoir l'ombre de la boîte et d'orienter l'axe de l'instrument dans la direction du soleil.

Mais il ne suffit pas, comme l'a recommandé Pouillet, de recouvrir d'une ou de plusieurs couches de noir de fumée la base de la boîte qui reçoit le rayonnement solaire. J'ai observé que la nature de l'enduit absorbant dont elle est recouverte exerce une influence notable sur les résultats obtenus; si, en effet, la face recouverte ainsi de noir de fumée est en métal poli, on conçoit qu'une partie des radiations obscures pour lesquelles le noir de fumée est diathermane, comme l'a montré Melloni, traverse, sans être absorbée, la

---

[1] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXXI, pag. 1205 (décembre 1875).

couche de noir de fumée, et que, réfléchie par le métal poli, elle la traverse de nouveau sans perte. L'indication de l'instrument sera d'autant plus affaiblie par cette circonstance que la radiation solaire sera plus riche en rayons obscurs, c'est-à-dire vers midi ; à cette heure, et surtout aux époques de l'année où l'absorption atmosphérique est la plus faible, les radiations obscures sont plus abondantes, et dans le spectre solaire le maximum d'intensité calorifique se déplace au-delà du rouge extrême, comme l'ont démontré Melloni, M. Tyndall et M. Desains. Le peu d'adhérence du noir de fumée à la surface métallique doit aussi être un obstacle à la communication de la chaleur absorbée par cette couche à la boîte calorimétrique. D'autre part, si afin d'augmenter cette adhérence on emploie une couche de vernis noir mat, sur laquelle on dépose du noir de fumée en l'exposant à la flamme d'une bougie ou de l'essence de térébenthine, cette couche sera, par sa mauvaise conductibilité pour la chaleur, un obstacle à l'absorption complète de la chaleur.

Pour éviter ces inconvénients, j'ai cherché à rendre la couche absorbante entièrement métallique et à rendre intime son adhérence à la boîte calorimétrique.

Pour cela, je recouvre la base de cette boîte d'une couche de cuivre galvanoplastique à surface rugueuse ; il suffit pour cela de faire fonctionner cette base comme électrode négative dans un bain de sulfate de cuivre, l'électrode positive étant constituée par une lame de cuivre. Le courant de deux éléments Bunsen suffit pour donner au dépôt l'aspect mat et légèrement rugueux qui est nécessaire. Il est inutile d'ajouter que l'on recouvrira d'un vernis isolant les parties de l'instrument qui ne doivent pas recevoir le dépôt; mais comme le contact du sulfate de cuivre et de l'acier provoquerait un dépôt floconneux de cuivre qui empêcherait l'adhérence de la couche, il sera nécessaire de cuivrer faiblement au préalable la surface qui doit recevoir le dépôt. Il suffit pour cela de l'immerger à froid pendant quelque temps dans une solution alcaline de tartrate double de potasse et de cuivre, en la mettant en contact avec une lame de zinc plongée dans la même solution : on obtient par ce procédé bien connu une mince pellicule de cuivre d'une grande adhérence, et sur laquelle on peut déposer une couche adhérente de cuivre galvanoplastique. Au sortir du bain galvanique,

la surface cuivrée est plongée dans une solution très-acide de chlorure de platine et mise en communication avec le pôle négatif de quatre éléments Bunsen, dont le pôle positif communique avec une lame de platine placée en face de la boîte, dans le même bain. Le chlore se dégage sur la lame de platine, tandis qu'un dégagement abondant d'hydrogène a lieu sur la face cuivrée ; il se dépose en même temps sur le cuivre un précipité de noir de platine fortement adhérent, qui après la dessiccation présente une surface noir mat entièrement métallique et faisant corps avec la boîte. On peut aussi passer cette surface noire à la flamme d'une bougie, afin d'augmenter, s'il est possible, son pouvoir absorbant.

En comparant deux pyrhéliomètres de même construction, dont l'un était simplement noirci à la fumée, tandis que l'autre était muni de la couche absorbante dont je viens de donner la préparation, j'ai pu constater que l'absorption est plus complète avec l'enduit métallique, et que l'intensité calorifique mesurée est toujours un peu supérieure dans ce cas. Je ne pense pas que l'absorption soit encore complète avec une surface ainsi préparée, mais elle se rapproche beaucoup plus du cas théorique d'une absorption intégrale, de sorte que les valeurs obtenues par son emploi se rapprochent davantage de ceux que donnerait une surface dont le pouvoir absorbant serait égal à l'unité.

Afin d'éviter la communication de la chaleur absorbée par la boîte aux autres parties métalliques de l'appareil, l'ajutage sur lequel se visse le thermomètre est entouré d'un cylindre en caoutchouc durci qui est fixé sur le support de l'instrument par une monture métallique. Une manivelle fixée sur ce cylindre permet de faire tourner l'instrument autour de son axe, afin de faciliter la lecture du thermomètre. Le tout est monté sur un pied à trois branches et placé en plein soleil. Un double écran de 20 centim. de diamètre monté sur des tiges mobiles est placé au-dessus de l'instrument à une distance de 50 à 60 centim. On l'écarte latéralement en faisant tourner la douille qui supporte les tiges de l'écran, lorsqu'on veut observer l'instrument au soleil.

Par ces dispositions, j'obtiens un instrument dont la valeur en eau, constante et absolument invariable, peut être déterminée une fois pour toutes en comparant les résultats d'un grand nombre de déterminations calorimétriques ;

l'emploi de l'eau comme liquide calorimétrique nécessite au contraire autant de déterminations différentes que l'on fait de séries d'expériences, à cause de la facilité avec laquelle elle peut s'évaporer, surtout si l'on se borne aux dispositions recommandées par Pouillet. La détermination de la valeur en eau de l'instrument est une opération fondamentale ; elle détermine en effet la valeur absolue de toutes les mesures actinométriques, qui seront calculées au moyen du nombre fourni par le pyrhéliomètre.

Cette détermination était faite par Pouillet en pesant séparément la boîte d'argent et l'eau qu'elle contenait, et en calculant au moyen des chaleurs spécifiques connues la valeur en eau du système composé de la boîte, de l'eau contenue, et de la partie plongée du thermomètre. Je pourrais opérer de même avec mon pyrhéliomètre, mais je préfère mesurer directement la valeur en eau de toutes les parties de l'instrument qui participent à l'échauffement sous l'influence des rayons solaires. Il suffit de placer la boîte au dessus d'un petit bec de gaz placé à 20 centimètres environ au-dessous de la face noircie, et d'attendre que l'instrument ait pris une température fixe, ce que l'on obtient facilement, dans un air calme, en diminuant la hauteur de la flamme au moment où l'on veut atteindre cet état stationnaire. On plonge alors l'instrument dans un calorimètre à eau, et en opérant avec toutes les précautions adoptées dans la détermination de la chaleur spécifique des corps solides par la méthode des mélanges, j'obtiens avec précision la valeur cherchée. Cette méthode me paraît plus précise, en ce sens que l'expérience directe peut mesurer des influences dont le calcul ne tiendrait pas compte, et qu'en répétant cette détermination un grand nombre de fois on peut obtenir une précision aussi grande que l'on voudra.

Mais cet instrument est lourd et très-fragile, il nécessite aussi des observations au soleil et à l'ombre qui doivent durer au moins cinq minutes, afin qu'il puisse donner des variations thermométriques assez accusées pour que l'erreur relative de l'observation soit assez faible. Aussi je ne le considère que comme un étalon destiné à fixer par comparaison la valeur en calories des degrés de l'actinomètre que j'emploie pour mes séries d'observations.

La comparaison d'un grand nombre de séries m'a démontré, en effet, que les observations faites au milieu des villes populeuses sont souvent trop faibles et irrégulières; cet effet se produit surtout dans la matinée, quand

les premières fumées commencent à s'élever des villes et que le réchauffement dû aux rayons solaires élève dans l'air des masses de vapeurs irrégulièrement distribuées dans l'atmosphère. La direction du vent a aussi une grande influence, parce qu'elle oriente dans des sens différents les fumées, les vapeurs et les poussières qui s'élèvent au-dessus des villes, et que l'on aperçoit, quand on en est éloigné, sous la forme d'un brouillard grisâtre. Aussi est-il préférable de faire des observations actinométriques loin des centres populeux, et, si l'on est obligé de les faire dans les villes, de choisir pour lieu d'observations un point où ces influences exercent des perturbations aussi faibles que possible. Sous ce rapport, la maison que j'habite à Montpellier est très-favorablement placée : située à la limite de la ville de Montpellier, au Nord-Ouest, elle a sa façade exposée au Sud-Est; les jardins qui l'entourent et l'éloignement de la partie industrielle de la ville permettent de faire les observations actinométriques dans d'excellentes conditions, surtout si le vent souffle faiblement du nord-ouest; dans ce cas, les vapeurs et les fumées sont entraînées rapidement loin du lieu d'observations. Le vent du sud-est produirait l'effet contraire; mais comme les observations ne sont possibles que par un très-beau ciel et que le beau temps n'est durable à Montpellier que par les vents du nord-ouest, on voit que les inconvénients provenant du voisinage de la ville sont très-réduits.

Cependant, toutes les fois que je l'ai pu, j'ai fait des séries d'observations, soit au bord de la mer, soit à la campagne. Aussi ai-je cherché à construire un appareil actinométrique léger et facilement transportable qui puisse me donner rapidement et avec beaucoup de précision des valeurs relatives du rayonnement solaire. A ce sujet, je ferai une remarque sur les noms que l'on a donnés aux instruments destinés à ce genre d'observations.

Herschell leur a donné le nom d'actinomètre, tandis que Pouillet a donné le nom de pyrhéliomètre à l'instrument qui lui a servi à mesurer la valeur absolue de l'intensité calorifique du rayonnement solaire, et a réservé le nom d'actinomètre à d'autres instruments qui servent à mesurer le rayonnement nocturne. Afin d'éviter la confusion, et pour me conformer à un usage généralement adopté, je conserverai le nom de pyrhéliomètre aux instruments qui donnent directement la valeur absolue de l'intensité de la radiation en unités de chaleur, réservant le nom d'actinomètre à ceux qui,

ne donnant que des rapports de radiations, doivent être comparés préalablement à un pyrhéliomètre, si l'on veut en déduire des mesures absolues.

L'instrument qui me sert habituellement est donc un actinomètre. En voici la description :

Cet instrument (Pl. I, *fig.* 2) se compose d'un gros thermomètre à alcool absolu dont le réservoir sphérique a 40 millim. environ de diamètre, et la tige 300 millim. environ de longueur. La surface du réservoir est préalablement argentée par le procédé de M. Martin, afin de la métalliser, puis recouverte d'une mince couche de cuivre rugueux et de noir de platine, ainsi que je l'ai déjà dit. L'extrémité du tube est munie d'une ampoule en partie pleine d'alcool absolu. Le réservoir contient quelques gouttes de mercure ; en renversant l'appareil, le réservoir en haut, et en l'exposant au soleil, on engage dans le tube capillaire un index de mercure aussi long que l'on voudra ; en relevant le tube, l'excédant de mercure retombe dans la boule, et l'instrument est prêt à être observé. Quand, à la suite de plusieurs observations, l'index approche de l'ampoule, on peut, en renversant de nouveau l'instrument et en l'exposant au soleil, engager un nouvel index et continuer à faire d'autres observations. Si la hauteur du soleil est trop grande pour que le mercure reste dans la boule, comme cela arrive dans le voisinage du solstice d'été à midi, on observe l'index de mercure comme d'habitude, et avant qu'il ait rempli tout le tube on redresse l'instrument, la boule en bas, et on l'expose au soleil ; on engage ainsi une colonne d'alcool dans le tube, et, en renversant l'instrument pour l'observer, un index d'alcool se trouvera compris dans la colonne de mercure. On pourra, par l'un ou l'autre de ces moyens selon les circonstances, observer pendant toute la durée d'une même journée avec le même instrument, et allier une grande précision à une sensibilité aussi grande que l'on voudra.

La boule de ce thermomètre est située au centre d'une enceinte sphérique en laiton de 10 centim. environ de diamètre, polie à l'extérieur, noircie en dedans et munie, en face de la boule, sur le prolongement de l'axe du tube, d'un cylindre de bois qui porte deux écrans parallèles en plaqué d'argent bien polis, munis d'une ouverture circulaire de 30 millim. de diamètre. Cette disposition permet de régulariser le refroidissement de l'instrument, et d'observer avec exactitude, même dans un air agité.

J'ai tenu à limiter ainsi la largeur du faisceau qui tombe sur la boule de l'actinomètre. Je crois qu'il est bon, pour obtenir une absorption complète, d'éviter que la radiation solaire ne tombe sur la boule thermométrique, en partie sous une incidence rasante. On sait que le pouvoir réflecteur des surfaces dépolies augmente beaucoup sous des incidences très-obliques, et que cette augmentation est d'autant plus sensible que la longueur d'onde des radiations est plus grande. Or, les radiations qui ont la plus grande intensité calorifique sont précisément dans ce cas, de sorte qu'il paraît impossible d'obtenir une absorption complète, avec des surfaces noircies à la fumée ou même revêtues de l'enduit métallique absorbant dont j'ai parlé, quand l'incidence est rasante. Il est facile de s'en assurer, car, lorsqu'on noircit à la fumée une plaque métallique en l'exposant à la flamme d'une bougie, on y voit l'image rougeâtre et renversée de la bougie réfléchie par la surface du noir de fumée, si on la regarde sous une incidence rasante ; de même qu'en regardant sous la même incidence une lame de verre dépoli, on y voit l'image rougeâtre d'une bougie qu'on en approche.

Je pense que cette cause d'erreur doit influer sur les indications des actinomètres analogues à celui de Waterston. Dans mon actinomètre, au contraire, le diamètre de la boule étant de 40 millim. et celui du faisceau qu'elle reçoit n'étant que peu supérieur à 30 millim. (à cause du diamètre apparent du soleil), si l'instrument est bien centré, les rayons arrivent sur la boule sous une incidence assez faible pour que l'absorption soit à peu près complète.

Il est à remarquer qu'il importe peu, pour l'exactitude des mesures, que la chaleur absorbée se répartisse d'une manière uniforme dans la masse de l'alcool, ou que le liquide se partage dans le réservoir en couches superposées inégalement chaudes ; la marche de l'index totalise en effet la somme des dilatations des diverses parties de la masse liquide, et, comme dans aucun cas les différences de température de ses diverses parties ne peuvent excéder 1 ou 2 degrés, la dilatation totale sert réellement de mesure à la quantité de chaleur absorbée, comme cela a lieu dans le calorimètre à mercure de MM. Favre et Silbermann. Tout au plus pourrait-on objecter que la masse de liquide contenue dans le réservoir varie avec la température ; mais cette influence est négligeable, et l'on pourrait en tenir compte si

c'était nécessaire, en étalonnant l'instrument à des températures différentes, en été et en hiver.

L'axe de l'instrument est orienté vers le centre du soleil ; pour cela, l'enceinte sphérique de laiton est montée sur une boule en métal mobile dans tous les sens entre les deux coquilles d'une presse à vis portée par un pied à trois branches ; l'extrémité du tube porte un écran noir d'un diamètre légèrement supérieur à celui des écrans qui limitent le faisceau de rayons solaires et sur lequel on centre l'ombre qu'ils projettent.

L'observation du réchauffement de cet instrument au soleil et de sa marche à l'ombre, avant et après le réchauffement, exige certaines précautions. L'instrument étant abrité du rayonnement solaire par un double écran de 20 centim. de diamètre porté par des tiges fixées sur le pied de l'instrument, et placé à une assez grande distance, on observe sa marche de minute en minute, en se servant d'un chronomètre réglé sur le temps solaire vrai[1].

Le déplacement de l'index pendant une minute au soleil est suffisamment grand pour que l'on puisse en déduire une mesure précise ; mais l'observation de sa marche à l'ombre ne peut être faite immédiatement avant et après la minute d'exposition au soleil.

En effet, si, l'appareil étant abrité par l'écran, on observe de minute en minute la marche de l'index, on constatera qu'elle est parfaitement uniforme lorsque l'instrument s'est mis à peu près en équilibre de température avec l'air. La loi logarithmique du refroidissement ou du réchauffement se réduit pour de très-petits excès à une proportionnalité rigoureuse, et la courbe qui représente sa marche en fonction du temps est une ligne droite.

Si maintenant on enlève l'écran, l'index ne se met pas en mouvement aussitôt que les rayons solaires tombent sur la boule. Pendant un temps très-court, la chaleur incidente est employée à échauffer l'enveloppe métal-

[1] Dans mes premières expériences, je réglais le chronomètre sur le temps vrai, par l'observation de la hauteur du soleil au moyen d'un sextant et d'un horizon artificiel, et par un calcul d'angle horaire. Je trouve plus simple de faire usage du chronomètre solaire de M. Fléchet, construit par M. Bénévolo, opticien à Lyon. Cet instrument est d'un usage commode et suffisamment précis pour ce genre de recherches. On en trouvera la description dans la 1re édition du *Cours élémentaire d'Astronomie* de M. Delaunay.

lique ou vitreuse de la boule, et lui donner le léger excès thermométrique nécessaire pour que le flux de chaleur pénètre uniformément à l'intérieur. La marche de l'index va ensuite en s'accélérant, et au bout d'un certain nombre de secondes elle a pris un régime uniforme; c'est alors seulement que l'on peut mesurer le réchauffement pendant une minute. De même, dès que l'on a intercepté les rayons solaires avec l'écran, l'index ne s'arrête pas, il continue à monter encore ; sa marche se ralentit, et en moins d'une demi-minute elle a pris le régime uniforme qu'elle conservera quelque temps, et qui doit servir de mesure au refroidissement après l'exposition au soleil.

Il suit de là que l'observation du réchauffement au soleil pendant la minute qui suit l'admission des rayons solaires serait trop faible, de même que le refroidissement à l'ombre pendant une minute, immédiatement après que l'on a intercepté les rayons.

Après avoir essayé divers modes d'observations je me suis arrêté au suivant, qui n'exige qu'une durée de cinq minutes et donne une grande exactitude :

Dès que l'instrument a pris à peu près la température de l'air, j'observe sa marche à l'ombre pendant une première minute. Les rayons solaires sont alors admis, et je rejette l'observation faite pendant la seconde minute; celle de la troisième minute représente la valeur exacte du réchauffement.

L'écran étant replacé, je rejette encore l'observation de la quatrième minute, et je prends pour valeur exacte du refroidissement l'observation de la cinquième minute. Si les observations sont faites dans de bonnes conditions, la marche de l'index sera parfaitement uniforme avant et après l'exposition au soleil, mais le refroidissement après l'exposition sera toujours un peu plus rapide que celui que l'on observe avant, à cause de l'élévation de température qu'a subie le thermomètre au soleil.

J'insiste sur ces détails d'observations; car si l'on ne tient pas compte des perturbations dont je viens de parler, l'on s'exposera à des erreurs toutes les fois que l'on fera usage de la méthode dynamique, soit avec l'actinomètre de Waterston, soit même avec le pyrhéliomètre de Pouillet.

Forbes, dans ses recherches, n'a pas évité cette cause d'erreur ; il observait l'actinomètre d'Herschell pendant trois minutes, la première et la troisième à l'ombre, et la seconde au soleil. Herschell, dans ses instructions, avait recommandé de n'observer au soleil que trente secondes et de

doubler le nombre obtenu pour le ramener à la durée d'une minute. Forbes fait remarquer, avec raison, que le facteur par lequel il faut multiplier l'observation de trente secondes pour le ramener à une durée d'une minute, est en réalité plus grand que deux[1].

Dans le passage de son travail intitulé : « Réduction à un intervalle d'une minute ». il cite les expériences que Kæmtz a faites avec son actinomètre[2], et adopte avec lui le facteur 2,224, pour ramener à une durée d'une minute les observations faites en 30 secondes, quand cela était nécessaire.

Une pareille méthode me paraît manquer de précision, car l'accélération de l'échauffement pendant la première minute d'exposition au soleil, et à plus forte raison pendant les premières secondes, est variable avec l'intensité de la radiation, et l'on ne peut accepter un facteur constant pour augmenter sa valeur dans un rapport déterminé. Il me paraît bien plus simple et plus précis de rejeter la période d'accélération, pour n'accepter que celle où le réchauffement est devenu uniforme.

Il est à remarquer cependant que le réchauffement au soleil, après avoir pris un régime sensiblement uniforme, irait en décroissant si l'on prolongeait l'observation pendant un grand nombre de minutes: c'est qu'en effet, d'après la loi logarithmique du refroidissement, une même quantité de chaleur élèvera de moins en moins la température du thermomètre, à cause de l'accélération du refroidissement, à mesure que sa température s'élèvera ; on finirait même, au bout d'un certain temps, par obtenir une température stationnaire, qui est précisément celle que l'on observe dans la méthode statique ; mais, quelle que soit la valeur de l'échauffemen tpendant une minute, si on la corrige du refroidissement qui lui correspond, on trouvera toujours le même nombre, qui représente le réchauffement constant que la radiation solaire aurait communiqué à l'instrument, si sa température avait été à chaque instant égale à celle de l'enceinte dans laquelle il est placé. Aussi me suis-je toujours borné à noter la seconde minute d'observation au soleil, l'expérience m'ayant appris que l'on n'obtient pas plus de précision en augmentant la durée de l'exposition.

---

[1] *Philosophical Transactions,* 1842, part. II, pag. 246.
[2] Kæmtz ; *Lehrbuch der Meteorologie.* vol. III, pag. 21.

Corrections à faire subir aux indications de l'actinomètre.

1° Le réchauffement pendant une minute d'exposition au soleil sera augmenté de la moyenne des refroidissements ou diminué de la moyenne des réchauffements observés en une minute, avant et après l'exposition. En effet, le milieu de la durée de la seconde minute d'exposition est séparé par un égal intervalle de temps de deux minutes des observations du refroidissement qui l'ont précédé et suivi.

2° La section du tube thermométrique n'étant pas généralement constante, il faudra faire usage de tables de correction pour ramener la marche de l'index à celle que l'on aurait observée si le diamètre du tube avait été partout le même. Il est plus commode et tout aussi précis de faire usage de tubes divisés en parties d'égale capacité: je me suis servi, dans mes recherches, de deux actinomètres que j'ai construits moi-même et dont j'ai dressé la table de correction, et de deux autres, divisés en partie d'égale capacité; ces derniers ont été construits par M. Baudin, et je me suis assuré qu'ils ne nécessitaient aucune correction.

3° Les variations de la chaleur spécifique et du coefficient de dilatation de l'alcool, variables avec la température, exercent sur les indications de l'actinomètre des influences contraires, qui entre certaines limites de température se détruisent. En effet, le coefficient de dilatation de l'alcool, augmentant avec la température, tend à donner des indications d'autant plus fortes que la température initiale de l'actinomètre est plus élevée; mais d'autre part, la chaleur spécifique de l'alcool augmentant aussi avec la température, l'addition d'une calorie produira sur l'actinomètre une marche d'autant plus faible de l'index que sa température sera plus élevée, et comme nous n'avons pas à mesurer des températures, mais bien des quantités de chaleur, ces deux causes d'erreur agiront en sens inverse l'une de l'autre et se compenseront partiellement.

En effet, M. Regnault a représenté la chaleur spécifique de l'alcool par la formule empirique

$$C = a + 2bt + 3ct^2$$

dans laquelle l'on a : L. $a = \bar{1},7384166$
L. $b = \bar{3},0499296$
L. $c = \bar{6},3436027$.

On en déduit, pour la chaleur spécifique de l'alcool, les nombres suivants :

A la température de	0°	+ 10°	+ 20°	+ 30°	+ 40°
la chaleur spécifique est	0,5475	0,5706	0,5949	0,6207	0,6474

Et pour ramener les indications de l'actinomètre à ce qu'elles seraient à la température de zéro, il faudrait les multiplier par le rapport de la chaleur spécifique de l'alcool à la température de l'observation, à sa chaleur spécifique à zéro.

Ces facteurs numériques sont

à la température de	0°	+ 10°	+ 20°	+ 30°	+ 40°
	1	1,042	1,086	1,134	1,182.

Le volume de l'alcool à diverses températures est représenté, d'après les recherches de M. I. Pierre, par la formule empirique

$$v = 1 + at + bt^2 + ct^3$$

dans laquelle
$a = 0,001\ 048\ 630\ 1$
$b = 0,000\ 001\ 751\ 0$
$c = 0,000\ 000\ 013\ 4$

Le coefficient de dilatation cubique du cristal avec lequel on construit les réservoirs thermométriques est environ $k = 0,000\ 023\ 3$.

Le volume apparent de l'alcool dans le cristal sera donc, à t^o

$$v = 1 + (a - k)\,t + bt^2 + ct^3,$$

et son coefficient de dilatation réel à la température t s'obtiendra en prenant la dérivée du volume par rapport à la température

$$\frac{dv}{dt} = a - k + 2bt + 3ct^2.$$

En calculant la valeur de ce coefficient à diverses températures, on trouve à la température de

0°	10°	20°	30°	40°
0,001 025 330	0,001 064 370	0,001 111 450	0,001 166 570	0,001 229 730

Pour réduire les degrés observés à la valeur qu'ils auraient si la température initiale de l'actinomètre était toujours égale à zéro, il faudra les multiplier par le rapport du coefficient de dilatation de l'alcool à la température de zéro, à son coefficient à la température de l'observation. Les facteurs numériques ainsi calculés sont :

à la température de	0°	10°	20°	30°	40°
	1	0,9633	0,9200	0,8789	0,8338.

Si donc l'on veut tenir compte à la fois de la variation de la dilatation et de celle de la chaleur spécifique, les coefficients de réduction seront les produits de ceux qui les représentent séparément, c'est-à-dire

à la température de	0°	10°	20°	30°	40°
	1,0000	1,0040	0,9996	0,9964	0,9859.

On voit donc que la correction est absolument négligeable entre les limites de température de 0° et 25° environ; au-dessus de 30°, il sera bon de la faire, et l'on y arrivera, soit en interpolant et en étendant au besoin la table ci-dessus, soit en construisant la courbe de ces coefficients. La température initiale de la boule est donnée approximativement par un petit thermomètre que l'on introduit par l'ouverture de l'actinomètre et que l'on y laisse pendant le temps que l'instrument emploie à se mettre à peu près en équilibre de température avec l'air.

4° Enfin, il est une correction qui est inutile si l'on entreprend les observations dans un but simplement météorologique, c'est-à-dire si l'on cherche les quantités de chaleur réellement reçues, mais qui est nécessaire dans les autres cas. La distance du soleil à la terre n'est pas constante, et si l'on veut comparer entre elles les quantités de chaleur que le soleil nous aurait envoyées si sa distance à la terre fût demeurée constante, il faudra adopter la valeur de la distance qui correspond à une position remarquable de la terre, par exemple à l'équinoxe du printemps. Il suffira alors de multiplier les résultats obtenus par le rapport du carré du rayon vecteur du soleil le jour

de l'observation, au carré de ce rayon au moment de l'équinoxe du printemps; les valeurs de ces rayons vecteurs sont données par la *Connaissance des temps*.

Voici deux exemples: l'un est une observation prolongée dans le but d'étudier les qualités de l'instrument; il n'est pas toujours facile d'obtenir des résultats aussi nets que ceux que nous avons obtenus ce jour-là, il faut pour cela un temps calme et un très-beau ciel. L'autre est le type d'une observation faite dans les circonstances normales.

1° Observation prolongée.

15 avril 1875. Beau temps, vent du nord faible.

Temps solaire vrai.		Actinomètre A:1. (1).	Actinomètre corrigé (2).	Différences.	
Ombre....	9h.21m	176,5	178,8	»	Réchauffement avant, 4,1.
	22	180,5	182,9	+4,1	
Soleil.....	23	184,5	187,0	4,1	
	24	204,0	206,9	+19,9	Rejeté.
	25	227,5	239,2	23,3	Réchauffement pendant, 23,3.
	26	251,0	253,5	23,3	
Ombre....	27	274,5	276,8	23,3	
	28	281,0	283,3	6,5	Rejeté.
	29	284,3	286,4	+3,1	Réchauffement après, 3,0.
	30	287,3	289,5	+3,1	
	31	290,2	292,4	+2,9	

Réchauffement corrigé $= 23,3 - \frac{7,1}{2} = 23,3 - 3,5 = 19,8$.

[1] Étant obligé de me servir de plusieurs instruments différents, j'ai l'habitude de désigner chaque boule en laiton par une des lettres de l'alphabet, et chaque thermomètre à index par un numéro d'ordre, de sorte qu'un thermomètre étant vissé dans une boule de laiton, l'actinomètre qui en résulte est représenté par la lettre de la boule jointe au chiffre du thermomètre.

[2] de la non-cylindricité du tube, à l'aide d'une table.

2° Observation normale.

4 janvier 1876. Très-beau temps, vent du nord-ouest, faible.

Temps solaire vrai.		Actinomètre A. 1.	Actinomètre corrigé.	Différence.	Température de la boule 18°,0, pas de correction.
Ombre...	$11^h,43^m$	218,0	220,8	»	Réchauffement $= 21,8 + \frac{1,6}{2} = 21,0$.
Soleil.....	44	219,2	222,0	+1,2	
	45	236,0	238,6	»	Réduit en calories = 1,288.
Ombre...	46	258,0	260,4	+21,8	Milieu de l'observation = $11^h45^m30^s$.
	47	262,6	265,0	»	Épaisseur atmosphérique, 2,47.
	48	263,0	265,4	+0,4	

CALCUL DES ÉPAISSEURS ATMOSPHÉRIQUES.

Pouillet a adopté, pour calculer l'épaisseur atmosphérique traversée par les rayons solaires, la formule de Lambert[1], à laquelle il a donné la forme suivante

$$\varepsilon = \sqrt{2rh + h^2 + r^2 \cos^2 z} - r \cos z$$

dans laquelle ε représente l'épaisseur atmosphérique, r le rayon moyen de la terre, h la hauteur de l'atmosphère, et z la distance zénithale du soleil.

Il a adopté $h=1$; $r=80$.

Cette formule ne saurait être acceptée : en effet, elle représente les longueurs géométriques des chemins parcourus à travers l'atmosphère par les rayons solaires tombant sous une incidence z, en admettant que la hauteur de l'atmosphère soit $\frac{1}{80}$ du rayon terrestre moyen, et en prenant cette hauteur pour unité. Or, si l'on suppose l'atmosphère partagée en couches concentriques de même épaisseur, mais de densité décroissante à mesure qu'on s'éloigne de la surface de la terre, une ligne droite faisant un petit angle avec la verticale sera coupée par ces couches en parties égales, mais dans une direction très-oblique; elle sera divisée en parties d'autant plus petites

---

[1] *Photometria*, pag. 393.

qu'elles seront plus éloignées de la surface de la terre. Il en résulte que les éléments de chemins parcourus par les rayons obliques du soleil dans leur trajet atmosphérique seront proportionnellement plus longs dans les parties basses et denses que dans les parties élevées, dont le pouvoir absorbant doit être très-faible. Cette formule ne serait vraie que dans l'hypothèse non admissible où la densité de l'atmosphère serait la même à toutes les hauteurs ; en réalité, elle représente des masses d'air d'autant plus faibles que les rayons incidents sont plus obliques. Il importe donc, pour avoir une valeur exacte de la masse atmosphérique traversée, de multiplier chacun des éléments de chemin parcouru par la densité de la couche atmosphérique correspondante, et de faire la somme des termes obtenus en l'étendant à toute la hauteur de l'atmosphère. C'est ce que fit Bouguer[1] en partant de la loi logarithmique du décroissement de la pression quand on s'élève dans l'atmosphère, et en supposant la température constante. Il obtint ainsi l'équation

$$m = \int \frac{(1-z)(a+x)\,dx}{\sqrt{b^2 + 2ax + x^2}}$$

dans laquelle m représente la masse atmosphérique traversée, a le rayon terrestre, x la hauteur au-dessus du sol de la couche atmosphérique considérée, $1-z$ la densité de l'air qui compose cette couche, sa densité à la surface de la terre étant $=1$.

En intégrant cette équation, il obtint une série convergente qui lui permit de calculer la masse atmosphérique traversée sous diverses obliquités par les rayons solaires, en prenant pour unité l'épaisseur qu'aurait l'atmosphère si l'air y avait partout la même densité et le même poids qu'à la surface.

Nous donnons plus loin un tableau des épaisseurs ainsi calculées par Bouguer pour diverses distances zénithales. Ces valeurs ne sont pas tout à fait exactes, puisque Bouguer a adopté comme valeur de la soustangente de la courbe qui représente le décroissement de la pression atmosphérique avec la hauteur 3911 toises, valeur déduite des observations faites par de la Hire en Provence, ainsi qu'une valeur seulement approxima-

[1] *Traité d'Optique*, pag. 331.

tive du rayon terrestre ; mais les calculs de ce genre sont sujets à tant de causes d'incertitude, vu le peu de précision de nos notions relatives à la hauteur réelle de l'atmosphère, et, de plus, l'absorption qu'exerce l'air traversé par les rayons solaires est tellement sujette à varier avec la proportion de vapeur d'eau contenue à la surface de la terre et dans les régions supérieures de l'atmosphère, qu'une rectification basée sur nos connaissances actuelles aurait peu de valeur. Des études ultérieures sur l'absorption de la chaleur et de la lumière par notre atmosphère sont indispensables pour donner à ces calculs la précision qui leur fait actuellement défaut.

En réalité, il est plus simple et presque aussi précis d'admettre que l'absorption est confinée aux couches inférieures de l'atmosphère, car M. Tyndall a démontré que les gaz parfaits ont un pouvoir absorbant presque nul pour la chaleur et la lumière, tandis qu'une action prépondérante est exercée par la vapeur d'eau qui est confinée dans les régions inférieures de l'atmosphère, ainsi que par les fumées et les poussières qui exercent une action simplement perturbatrice qui n'est pas de nature à être calculée. Dans ces conditions, on peut supposer que la couche absorbante est limitée par deux plans parallèles, dont l'un est la surface même de la terre, et l'autre est placé à la distance inconnue, mais relativement très-faible, où la vapeur d'eau a presque disparu. Alors, les épaisseurs traversées varient proportionnellement à la sécante de la distance zénithale du soleil, et cette loi ne peut être en défaut que dans les cas où le soleil est très-voisin de l'horizon ; mais alors, de même que dans les phénomènes de la réfraction astronomique, l'incertitude causée par le mélange irrégulier de masses d'air inégalement chaudes et humides et leur opacité relative est telle qu'aucune formule précise n'est applicable à des hauteurs du soleil inférieures à 15°, et qu'il faut renoncer à calculer avec quelque probabilité l'absorption produite dans ces circonstances, de même qu'on a dû y renoncer pour la réfraction astronomique. J. Forbes et M. Soret se sont en effet bornés à appliquer dans leurs recherches la loi des sécantes dans toute sa simplicité, et cette adoption est légitime dans les circonstances où ils ont opéré.

Nous avons été amené, par la nature même du sujet que nous traitons, à établir une liaison nécessaire entre l'absorption atmosphérique et la

réfraction astronomique. Cette liaison avait frappé J. Forbes, qui a rappelé dans son important Mémoire les travaux remarquables de Laplace sur la réfraction astronomique[1].

Laplace a été conduit, dans ses travaux sur la réfraction atmosphérique, à lier cette étude à celle de l'absorption que l'atmosphère exerce sur la lumière qu'elle transmet sous diverses obliquités. L'équation différentielle de la trajectoire d'un rayon lumineux à travers l'atmosphère supposée composée de couches concentriques de densités décroissantes quand la hauteur augmente, est en effet tellement liée à l'absorption atmosphérique qu'il est toujours possible de déduire l'absorption de la réfraction. La nature du sujet que nous traitons ne nous permettant pas de nous livrer aux développements mathématiques que comporterait l'étude de la réfraction atmosphérique, nous nous bornerons à renvoyer le lecteur au troisième chapitre du dizième livre de la *Mécanique céleste* de Laplace, et à la démonstration de la loi de l'absorption que Forbes a donnée dans son travail, en s'aidant des notes de Bowditch dans sa traduction de la *Mécanique céleste.*

Il arrive ainsi à la formule très-simple

$$\text{Masse atmosphérique} = \frac{\text{Réfraction astronomique}}{58'',36 \times \text{sin. distance zénithale.}}$$

La masse prise pour unité est celle qui correspond à une transmission verticale; la réfraction évaluée en secondes est déduite des tables de réfraction astronomique que l'on trouve dans la *Connaissance des temps*.

Cette formule présente un accord remarquable avec celle de Bouguer. Il est toutefois nécessaire de faire remarquer qu'elle emprunte pour la détermination de ses constantes des nombres trouvés par Bouguer. Quoi qu'il en soit, elle se recommande par sa grande simplicité, et elle est d'un usage très-commode. Nous donnons ici une table des épaisseurs atmosphériques calculées pour certaines valeurs de la distance zénithale,

1° Par la formule de Bouguer;

2° Par la formule déduite des équations de Laplace;

3° Par la formule des sécantes ;

4° Par celle de Lambert.

---

[1] Laplace; *Mécan. céleste*, tom. IV, liv. 10e, chap. I et II: *Des réfractions astronomiques et des réfractions terrestres.*

TABLE DES ÉPAISSEURS ATMOSPHÉRIQUES CORRESPONDANT A DIVERSES HAUTEURS DU SOLEIL CALCULÉES AU MOYEN DES FORMULES

DISTANCES ZÉNITHALES.	DES SÉCANTES.	DE LAPLACE.	DE BOUGUER.	DE LAMBERT.
0°	1,0000	1,0000	1,0000	1,00
10°	1,0154	1,0164	1,0153	1,01
20°	1,0642	1,0651	1,0642	1,06
30°	1,1547	1,1556	1,1547	1,15
40°	1,3054	1,3060	1,3050	1,30
50°	1,5557	1,5550	1,5561	1,54
60°	2,0000	1,9954	1,9903	1,96
70°	2,9238	2,9023	2,8998	2,80
75°	3,8637	3,8087	3,8046	3,58
80°	5,7588	5,5711	5,5600	4,92
85°	11,4737	10,2165	10,2002	7,51
86°	14,3356	12,1512	12,1401	8,28
87°	19,1073	14,8723	14,8765	9,18
88°	28,6537	18,8825	19,0307	10,20
89°	57,2987	25,1374	25,8067	11,37
90°	Infinie.	35,5034	35,4955	12,69

Si l'on construit les quatre courbes des épaisseurs calculées par ces formules en fonction de la distance zénithale, on remarquera:

1° Que les courbes de Laplace et de Bouguer coïncident sensiblement dans toute leur étendue;

2° Que la loi des sécantes est d'accord avec les deux formules précédentes jusqu'à une distance zénithale de 70° environ. Entre 70 et 90°, la loi des sécantes donne des résultats plus élevés;

3° Que la formule de Lambert donne au contraire des résultats trop faibles; qu'elle ne s'accorde avec les précédentes que jusqu'à des distances zénithales de 45°; au-delà, elle donne des résultats de plus en plus faibles.

Le tracé de ces courbes est très-commode pour convertir rapidement des

épaisseurs calculées par l'une des quatre formules en celles que l'on déduirait de l'une quelconque des trois autres. Sous ce rapport, il peut rendre d'utiles services aux personnes qui s'occupent d'études relatives à la radiation solaire.

Mais de nouvelles recherches sont indispensables pour que l'on puisse représenter par une formule rigoureuse les masses d'air traversées sous diverses obliquités. Les données numériques nous font malheureusement défaut, car nous ne connaissons exactement ni la loi du décroissement des températures à diverses hauteurs, si tant est que l'on puisse établir une loi générale de ce décroissement, ni le décroissement de l'humidité quand l'altitude augmente, et nous ne pouvons encore nous attendre à cet égard à trouver une loi précise, ni enfin la véritable hauteur de l'atmosphère. Ces études sont donc encore entourées d'une obscurité que les observations aérostatiques qui se multiplient de nos jours avec la plus louable activité pourront peut-être dissiper en partie. Dans ces conditions, la formule des sécantes nous paraît devoir être conservée jusqu'à des distances zénithales de 70°; au-delà, nous ferons usage des formules de Laplace ou de Bouguer.

La distance zénithale du soleil est calculée au moyen de l'heure solaire vraie du milieu de l'observation, au moyen de la formule connue

$$\text{Cos } z = \sin \lambda \sin d + \cos \lambda \cos d \cos y$$

dans laquelle z représente la distance zénithale cherchée, λ la latitude du lieu, d la déclinaison du soleil à midi, et y l'angle horaire du soleil au moment du milieu de l'expérience. Il m'a paru inutile de corriger les distances ainsi calculées de la réfraction astronomique, car les mesures de la radiation perdent beaucoup de leur exactitude quand la distance zénithale du soleil est trop forte, et c'est dans ces circonstances seulement que la réfraction pourrait influer sur les résultats obtenus.

Il est à remarquer qu'il existe une connexion très-étroite entre la formule barométrique, celle de la réfraction atmosphérique et celle des masses atmosphériques traversées sous diverses obliquités. Un progrès réalisé dans l'une quelconque de ces études entraînera nécessairement l'acquisition de notions plus précises sur les autres.

Constatons à ce sujet que l'influence perturbatrice que nous avons

signalée d'après Forbes, et qui est exercée par le voisinage de deux stations voisines séparées par une grande différence d'altitude, se fait sentir aussi bien sur les mesures actinométriques que sur les nivellements barométriques. Il est hors de doute qu'elles doivent avoir une influence aussi marquée sur la réfraction atmosphérique. M. Plantamour[1] a depuis longtemps signalé les différences horaires des altitudes de deux stations fixes calculées au moyen de la formule barométrique de Laplace. Cette différence provient de ce que dans la formule barométrique on admet pour le décroissement de la température avec la hauteur une proportionnalité qui n'est sensiblement vérifiée qu'à certains moments de la journée, notamment le matin et le soir. Cependant, comme le fait remarquer M. Martins[2], le décroissement anormal de la température, quand la hauteur augmente, influe tout aussi bien sur les nivellements géodésiques faits au moyen du théodolite que sur ceux que l'on déduit de la formule barométrique, ce qui prouve que la même cause influe sur l'exactitude de cette formule aussi bien que sur la réfraction atmosphérique, et, pouvons-nous ajouter aussi, sur le calcul de la masse d'air traversée par les rayons solaires. Comme l'a fait remarquer M. Martins, pour la station supérieure un plateau découvert ou un sommet isolé, pour la station inférieure une plaine ouverte et non une gorge ou un vallon étroit, telles sont les conditions topographiques les plus favorables. Ces conditions compensent souvent et au-delà l'influence de l'éloignement. Ainsi, MM. Bravais et Martins firent, en 1841, 34 observations barométriques correspondantes de jour et de nuit[3], Bravais au sommet du Faulhorn, M. Martins à Brienz; ils étaient pour ainsi dire sur la même verticale, car, du sommet du Faulhorn, Brienz est vu sous un angle de 12° 26′ seulement. Cependant les 34 observations donnèrent 2661 m pour l'altitude du Faulhorn, chiffre inférieur de 22 m au chiffre réel.

---

[1] *Mesures hypsométriques dans les Alpes, exécutées à l'aide du baromètre* (*Mém. de la Soc. de phys. et d'hist. nat. de Genève*, tom. XV, 1860).

[2] *Sur l'influence de la distance, et la correction horaire des différences de niveau obtenues à l'aide de deux baromètres correspondants*. Lettre de M. Ch. Martins à M. E. Plantamour (*Arch. de Genève*, tom. IX, pag. 185, 1860).

[3] *Annuaire Météorol. de la France pour 1850*, pag. 103 et 126; et *Annuaire Météorol. de la France pour 1851*.

Les observations d'altitude du mont Blanc conduisent à des résultats analogues. Ainsi, les observations calculées au moyen des correspondances les plus éloignées, Lyon, Milan, Marseille et Rousseaux (Cher), donnent sensiblement le même chiffre que les stations les plus rapprochées, Chamounix, Aoste, le Saint-Bernard et Genève, d'après les calculs de M. Delcros.

Ces remarques sont entièrement applicables aux déterminations correspondantes de la radiation solaire faites à des altitudes différentes; elles expliquent les anomalies signalées par M. Forbes dans les observations correspondantes qu'il fit en 1832 avec Kæmtz sur le Faulhorn et à Brienz; elles doivent laisser des doutes sur la précision des mesures qui ont été faites dans ces circonstances. Il suffit en effet d'avoir observé les phénomènes qui se passent dans les vallées étroites quand on les observe le matin, d'un sommet élevé. Souvent, même par les plus beaux temps, on voit de ces hauteurs les vapeurs accumulées au fond des vallées former comme une espèce de mer grisâtre qui cache complétement le fond de la vallée. A mesure que le soleil s'élève, la chaleur absorbée dans ces parties profondes tourmente cet océan nuageux qui s'élève en se dissolvant par places, et laisse apercevoir la vallée par des trouées irrégulières. Bientôt le fond de la vallée devient complétement visible, mais les vapeurs ainsi soulevées et devenues transparentes par suite de leur dissolution dans l'air viennent affecter les observations faites à la station supérieure. C'est ainsi que Forbes a vu sur le Faulhorn l'humidité croître constamment du matin au soir, fait qui est signalé par Dove[1] comme très-normal, tandis qu'à Brienz l'humidité de l'air atteint un minimum vers 1 ou 2 heures de l'après-midi. Aussi Forbes a-t-il observé que le maximum de l'intensité de la radiation solaire est plus tôt atteint au Faulhorn qu'à Brienz, et que les courbes qui représentent ses variations aux deux stations présentent une inflexion avant et après leur maximum. A la station supérieure, la radiation était plus intense dans la matinée que l'après-midi et le maximum était atteint vers 10 ou 11 heures, tandis que l'époque du maximum se rapprochait, à la station inférieure, du maximum de sécheresse de l'air.

---

[1] *Dove's repertorium*, tom. IV, pag. 264.

Je crois qu'il est permis de conclure, des considérations qui précèdent, que les observations de ce genre présenteront plus de régularité et seront plus comparables quand elles seront faites: à la station supérieure, au centre d'un plateau assez étendu ; à la station inférieure, au milieu d'une plaine aussi étendue que possible, et qu'elles pourront être continuées pendant une ou plusieurs journées, du matin au soir. C'est d'un choix heureux de ces deux stations, et du nombre et de la régularité des observations qui y seront faites, que dépendra l'exactitude des expériences qui pourront être tentées en vue de la détermination de la constante solaire.

OBSERVATIONS FAITES DANS LE DÉPARTEMENT DE L'HÉRAULT EN 1875.

Il est très-difficile de pouvoir rencontrer, pour une série d'observations, une belle journée pendant laquelle l'air soit assez calme et le ciel d'un bleu pur, et qui se maintienne sans altération du matin au soir. Cette difficulté, sur laquelle M. Forbes a insisté[1], et qu'il n'a certainement pas exagérée, je l'ai si souvent rencontrée à Montpellier, que j'ai dû abandonner un assez grand nombre de séries commencées sous les auspices les plus favorables, et interrompues, soit par un changement du temps, soit par un simple voile blanc qui paraissait à un certain moment sur le ciel et qui diminuait très-notablement l'intensité de la radiation. Ces voiles, qui sont l'un des échecs les plus graves auxquels on est exposé dans ce genre de recherches, me paraissent dus à des courants supérieurs qui, à leur surface de contact avec des courants inférieurs plus chauds et plus humides, laissent déposer un léger nuage constamment redissous et constamment reformé. Il faut une certaine habitude pour les reconnaître au moment de leur apparition. L'emploi du cyanomètre serait précieux dans ce genre de recherches ; l'observation de la polarisation atmosphérique est aussi d'un grand secours. C'est en l'absence de ces voiles blancs que la polarisation atmosphérique se manifeste avec le plus d'énergie ; par suite de l'habitude que l'on finit par contracter dans ce genre d'observations, on arrive à se passer de polariscope, et les

---

[1] *Philosophical Transactions*. 1842, part. II, pag. 273.

houppes d'Haidinger apparaissent à l'œil de l'observateur sans même qu'il cherche à les voir. Si un voile blanc était passé inaperçu, l'apparition vers le coucher du soleil de légers *strati* à l'horizon en serait un indice certain, car ces *strati* représentent la surface qui produit le voile vue par sa tranche. Il est important de tenir compte de ces observations dans la discussion des résultats obtenus.

Je me suis aussi servi avec succès d'un double verre jaune pour examiner l'état du ciel. La couleur bleue du ciel est presque complétement éteinte par ces verres, et les plus légers *cirrhi* se détachent alors d'une manière nette sur le fond presque noir du ciel.

Quand il m'est possible de rencontrer une de ces journées exceptionnelles dont je viens de parler, je multiplie les mesures le matin et le soir, car vers le milieu de la journée la radiation est à peu près constante pendant assez longtemps. Je trace la courbe horaire des calories[1] reçues par minute et par centimètre carré; les courbes ne sont pas toujours régulières; mais quand j'ai pu en rencontrer de telles, j'ai remarqué que presque jamais elles ne sont symétriques par rapport à l'ordonnée qui passe par le midi vrai ; elles sont généralement plus régulières l'après-midi que dans la matinée ; le maximum est atteint avant midi, et la tangente au midi vrai s'incline vers l'après-midi.

C'est là le caractère presque constant des journées d'été. Cette dissymétrie s'explique facilement par l'action de la chaleur solaire, qui absorbée par le sol réduit à l'état de vapeur l'humidité qu'il contient ; ces masses de vapeur se soulèvent en se mêlant irrégulièrement à l'air : de là l'irrégularité relative de la courbe du matin; mais quand le sol est relativement desséché, quand la température de l'air, après avoir dépassé le maximum, va en s'abaissant, la vapeur d'eau répandue dans l'air reste à l'état gazeux jusqu'au coucher du soleil: de là la régularité relative des observations de l'après-midi.

Pendant l'hiver il est possible, à Montpellier, de rencontrer de belles journées pendant lesquelles une série d'observations peut être continuée dans de bonnes conditions du matin au soir; c'est particulièrement au commen-

---

[1] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXXII, pag. 81, 1876.

cement de janvier et vers la fin de l'automne que l'on peut observer de pareilles journées; les courbes horaires des calories peuvent, dans ces cas-là, présenter une symétrie tellement approchée que l'on peut sans erreur sensible la considérer comme parfaite. Ce résultat doit être attribué à la grande sécheresse de l'air et de la terre à cette époque.

Les *fig.* 1 et 2 (Pl. II) représentent deux exemples, l'un de la courbe dissymétrique de l'été, l'autre de la courbe symétrique d'hiver.

Il est possible, dans ce dernier cas, de tracer la courbe qui représente les calories en fonction des épaisseurs atmosphériques traversées, et de chercher la loi de l'absorption atmosphérique et une valeur approchée de la constante solaire.

Or, cette courbe n'est jamais une logarithmique, comme Pouillet et Forbes l'ont trouvé.

Pouillet a représenté l'équation de ses courbes par une expression de la forme

$$C = Ap^{\varepsilon}$$

dans laquelle C représente l'intensité de la radiation. A la constante solaire, ε l'épaisseur atmosphérique traversée par les rayons solaires et p le coefficient, supposé constant toute la journée, de transmission de la radiation solaire. Cette formule, applicable aux lames diathermanes et à une source de radiations simples, ne l'est pas à l'atmosphère, et aux rayons solaires qui contiennent des radiations de réfrangibilités si différentes.

Forbes a calculé ses observations au moyen de la formule

$$x = \frac{1}{a} \log \frac{V - \frac{b}{a}}{v - \frac{b}{a}}$$

équation d'une logarithmique dans laquelle $\frac{b}{a}$ est la distance de l'axe horizontal à l'asymptote; x représente la masse atmosphérique traversée, V la constante solaire, et v la chaleur reçue. Cette formule est déduite de la diminution du coefficient d'absorption observée par Forbes, quand l'épaisseur traversée va en augmentant; mais il admet que ce coefficient n'augmente pas indéfiniment, et qu'au-delà d'une certaine épaisseur les radiations sont inté-

gralement transmises. Il a fait remarquer que l'accord apparent qui existe entre les résultats trouvés par Pouillet et leur calcul au moyen de sa formule, tient à une compensation fortuite due à ce que la formule de Lambert donne des épaisseurs trop faibles dès que leur valeur devient un peu considérable.

Je me suis assuré de la certitude de cette assertion en construisant les courbes de Pouillet au moyen de ses données, mais en substituant aux épaisseurs qu'il a données celles que l'on déduit, soit de la formule des sécantes, soit de celle de Laplace. La loi logarithmique ne s'y applique plus, et la sous-tangente, qui est constante dans les courbes de Pouillet, va en augmentant avec l'épaisseur. M. Soret a constaté que la loi de Pouillet ne s'applique pas à ses résultats, et s'est servi, pour calculer les observations faites à des altitudes différentes, de la formule

$$C = Ap^{\varepsilon H}$$

dans laquelle H représente la pression barométrique au lieu de l'expérience; il a pu représenter avec exactitude les résultats de ses expériences, et calculer la constante solaire.

L'intensité de la radiation transmise doit être probablement représentée par une expression de la forme

$$C = \Sigma\, Ap^{\varepsilon}$$

qui représente, d'après Biot[1], la loi de transmission à travers une série de lames diathermanes pour chacune desquelles A et p ont une valeur différente. Dans les couches atmosphériques, p doit varier d'une manière continue avec la hauteur, tandis que A représenterait la constante solaire de chaque radiation, c'est-à-dire la proportion de chacune des radiations qui serait reçue aux limites de l'atmosphère. Il resterait à chercher combien de termes il faudrait prendre pour représenter exactement la loi, et déterminer leurs constantes; en développant en série chacun des termes de la forme Ap^{ε} après l'avoir mis sous la forme $Ape^{m\varepsilon}$ (e représente la base des logarithmes népériens), et négligeant ceux de ces termes qui n'atteignent pas une certaine

[1] *Mém. de l'Acad. des Sc.* tom. XIV, pag. 466.

valeur, on obtiendrait en dernière analyse une expression relativement simple et qui se ramènerait à la forme

$$C = a + bx + cx^2 + \dots.$$

Mais ces calculs ne s'appliquent pas facilement aux résultats des observations, et je n'ai pas réussi à les représenter avec une approximation suffisante par ces formules ; aussi ai-je cherché à trouver quelque propriété géométrique de la courbe qui me permît d'arriver à son équation.

Je crois que cette propriété doit être cherchée dans la mesure du coefficient de transmission, car c'est dans la variation de ce coefficient que résident les différences trouvées par divers observateurs.

Or, si la formule de Pouillet ne représente pas la loi réelle, elle représente du moins la loi élémentaire de la transmission, car deux valeurs très-voisines de ε et de c obéiront toujours à la loi qu'elle représente, puisque la composition du faisceau incident n'a pas sensiblement changé entre ces limites ; on sait que c'est à la perte des rayons les moins réfrangibles, quand l'épaisseur augmente, qu'est due l'augmentation de transmissibilité que l'on observe dans ces circonstances, et par conséquent l'écart de la loi logarithmique.

Je puis donc considérer la courbe des calories en fonction des épaisseurs comme composée d'une infinité d'arcs de logarithmiques dans lesquelles A est constant, tandis que p varie d'une manière continue de l'une à l'autre, en augmentant avec ε, et dont elle serait l'enveloppe. Dans cette hypothèse, il serait facile de mesurer le coefficient de transmissibilité correspondant à une valeur déterminée de ε, en menant une tangente au point dont l'abscisse est ε, et en mesurant la valeur de la sous-tangente.

En différentiant l'équation $y = Ap^x$,

nous avons $$\frac{dx}{dy} = Ap^x \, L.p,$$

et $$\frac{y}{\frac{dy}{dx}} = \frac{1}{L.p}.$$

La sous-tangente $\frac{y}{\frac{dy}{dx}}$ servira donc à calculer p ; pour cela, je prends les

logarithmes vulgaires au lieu des logarithmes Népériens, ce qui donne la formule

$$\text{Log}.\, p = -\frac{\text{M}}{\text{sous-tangente}}$$

(M = 0,4342945). Nous devons prendre le signe — parce que y diminuant quand x augmente, la sous-tangente est négative.

Le coefficient de transmissibilité ainsi calculé représente le rapport de l'intensité de la radiation transmise à travers une épaisseur égale à l'unité, à l'intensité de la radiation avant cette transmission, en admettant que cette absorption ne change que la quantité et non la composition du faisceau incident. Sur la courbe tracée, je mesure les ordonnées correspondant à des valeurs de ε croissant en progression arithmétique, et par les points correspondants je mène des tangentes; or, les sous-tangentes vont constamment en augmentant, contrairement à la loi de Pouillet; elles ne tendent pas rapidement vers l'infini, comme cela résulterait des formules de Forbes, mais j'ai remarqué que, dans les séries les plus remarquables par leur netteté, les pieds des tangentes correspondant aux abscisses = 1, 2, 3, 4.... sont sensiblement équidistants, et si des différences se produisent, elles sont tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. On peut déduire de cette particularité une formule qui, si elle ne représente pas la loi cherchée, peut du moins servir utilement à calculer les valeurs de l'intensité de la radiation, dans les limites où elle a été mesurée.

En effet, l'équation de la sous-tangente s est

$$s = c + mx\,;$$

l'équation différentielle de la courbe sera

$$\frac{y}{\frac{dy}{dx}} = -(c + mx), \qquad \frac{dy}{y} = -\frac{dx}{c + mx}\,;$$

et en intégrant,

$$\text{L}.\, y = -\frac{1}{m}\,\text{L}.(c + mx) + \text{LC}\,;$$

d'où

$$y^m = \frac{\text{A}}{c + mx}\,.$$

Les valeurs numériques de m et de c se déduiront de la position des pieds des sous-tangentes ; A s'obtiendra en prenant la moyenne des valeurs sensiblement concordantes de

$$A = y^m (c + mx).$$

Cette équation représente la classe des courbes paraboliques ou hyperboliques, qui peut comprendre comme cas particulier la logarithmique de Pouillet, si dans l'équation différentielle de la courbe on fait $m = 0$, ce qui rend la sous-tangente constante.

Elle a pour asymptote l'axe des x ; la radiation transmise tend donc vers zéro quand l'épaisseur tend vers l'infini.

La constante solaire est $\sqrt[m]{\frac{A}{c}}$.

Les coefficients de transmissibilité se déduisent de la loi des sous-tangentes.

En effet, soit T ce coefficient ; nous aurons

$$L.T = \frac{1}{c + mx}, \qquad T = e^{\frac{1}{c + mx}}.$$

Équation d'une logarithmique qui a pour asymptote une droite parallèle à l'axe des x à une distance égale à l'unité, et dont l'ordonnée à l'origine est $e^{\frac{1}{c}}$.

Ce coefficient varie donc depuis une valeur minima $e^{\frac{1}{c}}$ qui représenterait la transmissibilité des rayons qui arrivent aux limites de notre atmosphère, et un maximum égal à l'unité, qui correspond au cas où, les rayons ayant traversé une épaisseur d'air infiniment grande, leur intensité tend vers zéro et où la transmisssion se fait sans perte. On pourrait donner à l'équation générale de l'intensité de la radiation transmise une forme plus commode et peut-être préférable.

L'équation $$y^m = \frac{A}{c + mx}$$

peut être mise sous la forme

$$y^m = \frac{\frac{A}{c}}{1 + \frac{m}{c} x}, \quad \text{ou} \quad y = \frac{\sqrt[m]{\frac{A}{c}}}{\left(1 + \frac{m}{c} x\right)^{\frac{1}{m}}}$$

Or, $\sqrt[m]{\frac{A}{c}}$ est la constante solaire Q, et en faisant $\frac{m}{c} = a$ et $\frac{1}{m} = b$, on obtient

$$y = \frac{Q}{(1 + ax)^b}.$$

Sous cette forme plus simple, il sera plus facile de calculer y en fonction de x, au moyen des valeurs connues de Q, a et b.

Nous avons dit que l'équation

$$y^m = \frac{A}{c + mx}$$

peut comprendre comme cas particulier la logarithmique de Pouillet. Cela est évident si, dans l'équation différentielle de la courbe, on fait $m = 0$; cette équation devient dans ce cas :

$$\frac{y}{\frac{dy}{dx}} = \frac{A}{c};$$

et en intégrant,

$$y = ke^{\frac{A}{c} x}.$$

Mais si dans l'équation générale on fait $m = 0$, cela n'est plus évident ; il est facile cependant d'obtenir le même résultat par une transformation.

En effet, l'équation différentielle

$$\frac{y}{\frac{dy}{dx}} = -(mx + c)$$

peut être mise sous la forme

$$\frac{dy}{y} = -\frac{dx}{mx + c} = -\frac{1}{m} \frac{d.\frac{mx}{c}}{1 + \frac{mx}{c}}.$$

En intégrant, on a

$$L.y = -\frac{1}{m} L\left(1 + \frac{mx}{c}\right) + L.k;$$

$$y = \frac{k}{\left(1 + \frac{mx}{c}\right)^{\frac{1}{m}}}.$$

Soit $\frac{mx}{c} = \frac{1}{n}, \qquad m = \frac{nx}{c};$

on a $$y = \frac{C}{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{\frac{nx}{c}}} = \frac{C}{\left\{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n}\right\}^{\frac{x}{c}}}.$$

Si l'on fait $m = 0$, on a $n = \infty$ et $\lim \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{n} = e$.

Donc $$y = C\frac{1}{e^{\frac{x}{c}}} = Ce^{-\frac{x}{c}},$$

équation qui est de la forme de la logarithmique de Pouillet.

Si dans certains cas les pieds de tangente n'étaient pas équidistants, ce que je n'ai pas encore observé, mais qui pourrait peut-être se produire dans d'autres cas, l'équation de la sous-tangente ne serait plus linéaire, mais pourrait être représentée par une expression parabolique de la forme

$$S = m + nx + px^2.$$

L'équation différentielle de la courbe serait alors

$$\frac{dy}{y} = -\frac{dx}{m + nx + px^2} = -p\frac{dx}{x^2 + rx + t}.$$

Si les deux facteurs en lesquels se décompose le trinôme $x^2 + rx + t$ sont imaginaires, auquel cas $\frac{r^2}{4} - t < o$, l'intégrale s'obtient facilement ; on a alors :

$$L.y = -p\frac{1}{\sqrt{t - \frac{r^2}{4}}} \text{arc tang} \frac{x - \frac{r}{2}}{\sqrt{t - \frac{r^2}{4}}} + L.C.$$

Mais je n'ai pas jugé nécessaire de pousser plus loin ce calcul, le cas au-

quel il s'applique ne s'étant pas présenté dans mes recherches. On voit que 'on peut obtenir dans la généralité des cas l'équation de la radiation transmise.

Mais la formule que je propose, et celles que l'on a employées précédemment, peuvent-elles être étendues au-delà des circonstances pour lesquelles elles ont été calculées ? Ce serait là une extrapolation qui n'est pas rigoureusement justifiée. Cependant, si l'on observe que, dans la formule que je propose, l'observation fondamentale de l'équidistance des pieds des tangentes qui sert de base à ma formule peut être assez approximativement vérifiée pour des valeurs de x variant depuis un nombre peu différent de l'unité jusqu'à 7, on peut invoquer la légitimité de son extension à l'intervalle compris entre un et zéro. Il serait difficile en effet de concevoir que la loi régulière entre les premières limites fût en défaut entre les secondes ; si même cela était, il n'est pas probable que l'écart fût bien grand ; dans tous les cas, une extrapolation de ce genre est le seul moyen qui permette d'évaluer approximativement la constante solaire, et, à ce titre, son emploi peut être justifié.

Je citerai ici les trois séries que j'ai trouvées assez régulières pour pouvoir être calculées.

La première est celle du 8 janvier 1875 ; les observations ont été faites avec un pyrhéliomètre de Pouillet dont la boîte était remplie d'eau, mais dont la base était platinée. La constante solaire 1,898, quoique supérieure à celle qu'a donnée Pouillet 1,763, est probablement trop faible, car elle est sujette à la cause d'erreur inhérente à l'emploi de l'eau comme liquide calorimétrique, et que nous avons signalée pag. 26. La courbe horaire est figurée Pl. II, *fig.* 1. On voit qu'elle est assez symétrique.

Station : Montpellier, près du Jardin des Plantes. Très-belle journée ; temps calme, ciel sans voile appréciable ; quelques nuages se sont montrés le soir au couchant.

La seconde série est celle du 4 janvier 1876. Les observations ont été faites avec l'actinomètre que j'ai décrit ; il en est de même des suivantes ; les séries de 1874 et celles de 1875 jusqu'au mois d'avril sont les seules qui

aient été faites au moyen du pyrhéliomètre de Pouillet à surface platinée et contenant de l'eau.

La constante solaire est 2,323.

La courbe horaire et celle des calories sont figurées Pl. III, *fig.* 1 et 2. La symétrie de la courbe horaire n'étant pas tout à fait rigoureuse, je me suis guidé, pour le tracé de la courbe des calories, de préférence sur les observations de l'après-midi.

Station : Montpellier, près du jardin des Plantes. Temps magnifique ; très-belle journée, sans le plus léger voile et sans un nuage au ciel.

La troisième série n'est basée que sur une demi-journée d'observations ; mais la limpidité de l'atmosphère était telle qu'à Palavas, lieu de l'observation, on voyait du bord de la mer, avec une grande netteté, le massif du Canigou qui en est éloigné de cinquante lieues environ ; la région du ciel voisine du soleil n'avait que très-peu d'éclat, signe d'une faible diffusion. L'atmosphère est restée très-limpide et sans un nuage jusqu'au coucher du soleil ; ces circonstances, jointes à un très-léger vent de N.-O., étaient très-favorables aux observations. La nature de la station où elles ont été faites peut leur donner un certain intérêt ; l'épaisseur atmosphérique a varié entre les limites très-étendues de 1,5 à 7 environ. La constante solaire est 2,133, nombre un peu inférieur au précédent, quoiqu'il en soit assez rapproché.

A la suite des résultats des observations, je donne les mesures faites sur la courbe qui les représente et les formules que j'en ai déduites ; j'ai adopté celles qui donnent l'intensité calorifique de la radiation en fonction de la constante solaire (Voir pag. 56), et qui sont, sous une autre forme, celles que j'avais données précédemment [1].

---

[1] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sc. de Paris*, tom. LXXXII, pag. 81 (1876).

SÉRIE DU 8 JANVIER 1875. — **Montpellier.**

Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.
8h 45m	0,626	5,90	2h 28m	0,921	3,47
9 53	0,952	3,34	2 53	0,797	4,08
10 43	1,079	2,77	3 23	0,666	5,50
11 23	1,088	2,53	3 33	0,631	6,10
12 53	1,060	2,54			

Mesures faites sur la courbe.

Épaisseurs	2	3	4	5	6
Calories mesurées	1,190	0,970	0,815	0,705	0,628
Sous-tangentes	5,10	5,95	6,80	7,65	8,50
Coefficients de transmissibil.	0,822	0,845	0,863	0,877	0,889
Calories calculées	1,177	0,981	0,838	0,733	0,644
Différences	—0,013	+0,011	+0,023	+0,028	+0,016

$$S = 3,4 + 0,85x \qquad y = \frac{1,898}{(1 + 0.025058\,x)^{1,1765}}$$

Observations météorologiques.

Baromètre à 0°	9h	767mm,4	Ciel très-serein.
	Midi.	767mm,4	
État hygrométrique	9h	0,74	Températures: Maxima 1,25
	Midi.	0,63	Minima —2,0
Vent	9h	N.-E. très-faible.	
	Midi.	N. faible.	

Série du 4 Janvier 1876. (Pl. III, *fig.* 1 et 2.) — Montpellier.

Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.
$8^h\ 49^m$	0,920	5,32	$1^h\ 18^m$	1,220	2,75
9 21	1,049	3,97	2 34	1,036	3,88
10 15	1,153	3,01	2 40	1,005	4,02
10 19	1,171	2,96	2 56	0,950	4,60
11 21	1,275	2,52	3 13	0.865	5,45
11 42	1,282	2,47	3 23	0,840	6,14
11 46	1,288	2,46			

Mesures faites sur la courbe.

Épaisseurs	2	3	4	5	6
Calories mesurées	1,39	1,16	1,02	0,925	0,85
Pieds des tangentes	7,90	10,85	13,80	16,75	19,70
Différences	»	2,95	2,95	2,95	2,95
Sous-tangentes	5,90	7,85	9,80	11,75	13,70
Coefficients de transmissibilité	0,844	0,880	0,904	0,919	0,924
Calories calculées	1,335	1,154	1,029	0,938	0,865
Différences	−0,055	−0,006	+0,009	+0,013	+0,015

$$S = 2{,}00 + 1{,}95\,x \qquad y = \frac{2{,}323}{(1 + 0{,}975\ x)^{0{,}512}}$$

Observations météorologiques.

Baromètre à 0°	9^h	$761^{mm},3$	Ciel très-serein.
	Midi.	$759^{mm},3$	
État hygrométrique	9^h	0,80	Températures: Maxima 18,8
	Midi.	0,53	Minima 2,4
Vent	9^h	N.-O. faible.	
	Midi.	N. faible.	

SÉRIE DU 5 OCTOBRE 1875. — **Palavas.**

Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	Temps solaire vrai.	CALORIES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.
11h 21m	1,147	1,47	3h 35m	0,967	2,70
12 20	1,269	1,46	4 8	0,911	3,55
2 15	1,158	1,80	4 37	0,719	5,20
2 35	1,068	1,95	4 57	0,625	6,95

Mesures faites sur la courbe.

Épaisseurs.......	1	2	3	4	5	6	7
Calories.........	1,375	1.075	0,930	0,820	0,743	0,680	0,640
Sous-tangentes...	3,4	5,5	7,4	8,8	11,6	13,9	16,0
Coefficients de transmissibilité...	0,745	0,834	0,877	0,902	0,918	0,930	0,939

$$S = 1,5 + 2,1\,x \qquad y = \frac{2,133}{(1 + 1,615\,x)^{0,43}}.$$

Observations météorologiques.

Baromètre à 0°....	Midi.	764mm,5	Ciel très-serein.
État hygrométrique.	Midi.	0,57	Températures { Maxima 28,6 ; Minima 19,7
Vent............	Midi.	O. N.-O. faible.	

La constante solaire est donc supérieure à 2, car j'ai lieu de croire que les valeurs trouvées dans la série du 8 janvier 1875 sont un peu trop faibles; j'en ai déjà donné la raison.

Les nombres que j'ai obtenus sont supérieurs à 1,763 donnés par Pouillet.

Forbes[1] avait trouvé, au moyen de l'actinomètre d'Herschell et des observations correspondantes qu'il fit avec Kæmtz au Faulhorn et à Brienz, 388,4 *actines*, soit, $2^{cal},847$, l'actine valant $0^{cal},00733$. Mais la nature de l'instrument dont il s'est servi laisse des doutes sur l'exactitude de ce nombre. M. Violle[2] a déduit de ses mesures actinométriques faites simultanément au sommet et à la base du mont Blanc le nombre 2,540.

De nombreuses observations sont encore nécessaires pour que nous puissions connaître exactement la constante solaire; ce ne sera que par la discussion des résultats obtenus par chaque observateur et par la comparaison des nombres obtenus par l'emploi de méthodes variées, que l'on pourra obtenir une valeur approchée de cette constante.

Le nombre et la variété des déterminations qui seront faites plus tard dans ce but pourront avoir une grande utilité, car elles montreront comment s'exerce l'absorption atmosphérique sur les points où les mesures auront été faites.

En effet, parmi les rayons solaires de réfrangibilités différentes, ceux dont la longueur d'onde est la plus grande sont le plus facilement absorbés par les milieux transparents pour les radiations lumineuses. Ainsi le verre, transparent pour toutes les radiations lumineuses et pour une partie des radiations obscures, devient de moins en moins transparent pour ces dernières à mesure que leur longueur d'onde augmente, à ce point qu'il est absolument opaque pour le rayonnement qui émane d'une source à cent degrés. De même, le sel gemme, transparent pour les radiations lumineuses et même pour la plupart des radiations obscures, devient-il de moins en moins diathermane pour le rayonnement qui provient de sources de températures de plus en plus basses.

La vapeur d'eau, et peut-être aussi l'air, doivent probablement agir de la même manière, et il est possible qu'une partie des radiations solaires, celle dont la longueur d'onde est comprise au-dessus d'une certaine limite, soit totalement arrêtée avant d'arriver aux couches atmosphériques que nous pouvons explorer. De même, à mesure que la masse atmosphérique traver-

[1] *Phil. trans.* 1842, part. II, pag. 261.

[2] *Compt. rend.*, tom. LXXXII, pag. 896.

sée par les rayons solaires devient de plus en plus considérable, certaines radiations, parmi les moins réfrangibles, doivent s'éteindre complétement avant d'arriver à la surface du sol. Il résulterait de cette extinction, de plus en plus complète à mesure que la masse atmosphérique augmente, que la constante solaire calculée au moyen de ces observations serait variable avec les circonstances où elle a été déterminée : le calcul, en effet, ne peut tenir compte que des rayons qui nous arrivent réellement; il les ramène à l'intensité qu'ils avaient aux limites de l'atmosphère, mais ceux qui manquent complétement lui échappent. Aussi la véritable interprétation de la signification de la constante solaire est-elle celle-ci :

La constante solaire représente l'intensité qu'aurait aux limites de l'atmosphère l'ensemble des radiations qui ont pu arriver sans être totalement absorbées jusqu'au lieu où elles ont été mesurées. Il est facile de montrer qu'il doit en être ainsi dans la série de nos expériences. Ainsi, prenons la série du 4 janvier 1876 (pag. 61). Si nous calculons la constante solaire au moyen des observations correspondant aux épaisseurs atmosphériques comprises entre

	2 et 3,	**3 et 4,**	**4 et 5,**	**5 et 6,**
nous trouvons				
	2,574,	**2,514,**	**2,296,**	**2,283,**

valeur qui diminue constamment quand la masse atmosphérique traversée augmente.

Ainsi, la mesure de cette constante en divers points du globe pourrait servir à évaluer approximativement la proportion des rayons complétement absorbés avant leur arrivée à la surface de la terre en ce point.

L'on voit de plus que toutes les valeurs que l'on pourra assigner à la constante solaire ne sont que des limites inférieures de sa valeur réelle; si de plus on pouvait tenir compte de l'absorption exercée par l'atmosphère solaire sur les radiations qui sont émises par sa masse, comme Laplace[1] a essayé de le faire, on arriverait à cette conclusion que l'intensité de la radiation qui serait émise par le soleil, s'il était privé de son atmosphère, serait très-

[1] *Mécanique céleste*, tom. IV, pag. 318.

considérablement supérieure à son intensité aux limites de notre atmosphère. Mais il serait téméraire, dans l'état actuel de nos connaissances, de faire des hypothèses même approximatives sur l'intensité de ce foyer calorifique; le développement des études d'astronomie physique date de peu de temps; la haute importance des découvertes faites récemment sur la constitution du soleil nous permet d'espérer un rapide accroissement de la somme de nos connaissances sur ce sujet, dans un avenir probablement peu éloigné.

Il était intéressant de comparer les résultats de mes séries avec celles de Pouillet et avec celle qu'a publiée M. Desains. Mais il faut observer d'abord que les nombres de Pouillet doivent être un peu affaiblis par les causes d'erreur dont j'ai déjà parlé pag. 26. De plus, il faut remarquer que Pouillet n'a pas porté son attention sur la dissymétrie à peu près générale des courbes horaires des calories; une seule contient deux observations faites dans la matinée, toutes les autres ne donnant que des observations faites l'après-midi. Celle de M. Desains, au contraire, correspond à une symétrie remarquable des observations faites pendant la journée du 25 avril 1875. Or, les observations que j'ai faites pendant les mois de mai, juin, juillet, septembre, m'ont toujours donné des courbes dissymétriques qui ne pouvaient être soumises au calcul. Il peut en être de même de celles de Pouillet, qui ont été faites pendant ces mois. J'ai réduit en calories les températures données par Pouillet, en les multipliant par le facteur 0,2624, qui représente la chaleur reçue en une minute sur un centimètre carré, correspondant à une élévation de température de un degré de son pyrhéliomètre; enfin, j'ai transformé les épaisseurs calculées au moyen de la formule de Lambert en épaisseurs déduites de la formule de Laplace. Je me suis servi pour cela du tracé des courbes qui donnent ces épaisseurs en fonction des distances zénithales et dont j'ai déjà parlé pag. 45.

Le tracé des courbes des calories en fonction des épaisseurs m'a permis de calculer les coefficients de transmissibilité.

Observations de Pouillet.

28 Juin 1837. | *27 Juillet 1837.*

HEURES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	CALORIES	HEURES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	CALORIES.
$7^h\ 30^m$	1,860	0,997	Midi	1,147	2,286
10 30	1,164	1,050	1^h »	1,174	1,273
Midi »	1,107	1,233	2 »	1,266	1,246
1 »	1,132	1,220	3 »	1,444	1,181
2 »	1,216	1,207	4 »	1,800	1,076
4 »	1,700	1,050	5 »	2,250	0,918
6 »	3,350	0,630	6 »	3,950	0,617

ÉPAISSEURS.	CALORIES.	TRANSMISSIBILITÉ.	ÉPAISSEURS.	CALORIES.	TRANSMISSIBILITÉ.
1	1,30	0,717	1	1,36	0,691
2	0,95	0,732	2	0,99	0,744
3	0,70	0,744	3	0,76	0,779
4	0,52	0,758	4	0,61	0,808
Coefficient d'après Pouillet, 0,7244.			Coefficient d'après Pouillet, 0,758,5.		

22 Septembre 1837.

HEURES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	CALORIES.
Midi »	1,507	1,207
1h »	1,559	1,181
2 »	1,800	1,128
3 »	2,200	1,050
4 »	3,000	0,813
5 »	5,650	0,501

ÉPAISSEURS.	CALORIES.	TRANSMISSIBILITÉ.
1	1,46	0,691
2	1,07	0,739
3	0,84	0,779
4	0,69	0,823

Coefficient d'après Pouillet, 0,7780.

11 Mai 1838.

HEURES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	CALORIES.
11h »	1,193	1,325
Midi »	1,164	1.338
1 »	1,193	1,325
2 »	1,288	1,273
3 »	1,473	1,233
4 »	1,900	1,102
5 »	2,580	0,958
6 »	4,200	0,708

ÉPAISSEURS.	CALORIES.	TRANSMISSIBILITÉ.
1	1,40	0,717
2	1,08	0,779
3	0,88	0,816
4	0,73	0,842

Coefficient d'après Pouillet, 0,7888.

4 Mai 1838.

HEURES.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	CALORIES observées.	CALORIES calculées.	DIFFÉRENCES.
Midi »	1,191	1,260	1,252	—0,008
1h »	1,223	1,233	1,240	+0,007
2 »	1,325	1,207	1,216	+0,009
3 »	1,530	1,128	1,140	+0,012
4 »	2,000	1,023	1,006	—0,017
5 »	2,750	0,839	0,837	—0,002
6 »	4,800	0,512	0,506	—0,006

ÉPAISSEURS	CALORIES.	SOUS-TANGENTES.	TRANSMISSIBILITÉ.
0	1,75	3,4	0,7451
1	1,30	3,6	0,7575
2	1,00	3,8	0,7686
3	0,79	4,0	0,7787
4	0,62	4,2	0,7881
5	0,49	4,4	0,7968

Coefficient d'après Pouillet, 0,7756.

Ces observations ont été calculées au moyen de la formule

$$y = \frac{1,752}{(1 + 0,0587\,x)^5}. \qquad \text{Constante solaire: } 1,752.$$

Cette dernière série étant la plus régulière de toutes, j'en donne la formule et la vérification.

On verra, par la seule inspection de ces tableaux, que les valeurs trouvées par Pouillet pour l'intensité calorifique des radiations sont probablement trop faibles. Mais il est plus important de comparer les transmissibilités.

Or, les transmissibilités calculées d'après les expériences de Pouillet sont plus faibles et varient entre des limites moins étendues que celles que j'ai trouvées à Montpellier.

Remarquons que la valeur des coefficients de transmissibilité est indépendante de la valeur absolue de l'échelle qui mesure les quantités de chaleur, de sorte que les résultats de Pouillet et les miens sont comparables sous ce rapport. De cette comparaison, on peut conclure :

1° Que, la transmissibilité à Paris variant entre des limites plus restreintes qu'à Montpellier, l'épaisseur atmosphérique restant comprise entre les limites de 1 à 4, les rayons reçus à Paris doivent être moins riches en radiations de faible réfrangibilité, c'est-à-dire qu'avant d'arriver au sol ils ont subi une plus forte déperdition des rayons obscurs.

2° La faible valeur des coefficients observés à Paris montre que, quoique les rayons solaires y soient moins riches en radiations peu réfrangibles, l'absorption y est cependant encore plus forte qu'à Montpellier.

VARIATIONS ANNUELLES DE L'INTENSITÉ DE LA RADIATION [1].

Ici encore, nous constatons une dissymétrie et des inégalités annuelles analogues à celles que l'on observe dans le cours d'une même journée. Le tableau suivant donne l'intensité calorifique de la radiation solaire observée à midi vrai, par de belles journées, les masses atmosphériques traversées à ce moment, et l'intensité qu'aurait cette même radiation, si la masse atmosphérique traversée était constante et égale à l'unité, c'est-à-dire à celle qui correspondrait à une transmission verticale. Nous avons obtenu ces derniers nombres, qui ne sont qu'approximatifs, en traçant la courbe des calories en fonction des épaisseurs, au moyen de plusieurs observations, et en la prolongeant jusqu'à l'ordonnée située à une distance égale à l'unité.

En regard de ces nombres se trouvent mentionnées les observations météorologiques faites au même moment.

Il serait utile de tracer la courbe dont ces calories sont les ordonnées et dont les abscisses sont les jours de l'année, ainsi que celle des épaisseurs atmosphériques à midi, aux divers jours. Mais nous nous proposons de ne la publier que lorsque nous pourrons disposer des résultats de plusieurs années d'observations.

[1] *Compt. rend. des séances de l'Acad. des Sciences de Paris*, tom. LXXXII, pag. 375 (1876).

OBSERVATIONS FAITES A MIDI VRAI EN 1875.

DATES.	INTENSITÉS calorifiques.	ÉPAISSEURS atmosphériques.	INTENSITÉS correspondant à une épaisseur = 1.	ÉTATS hygrométriques.	BAROMÈTRE à zéro.	VENT. Force — Direction.	STATIONS
8 janvier.	1,09	2,76	1,62	0,55	»	N. faible.	Montpellier, près du Jardin des Plantes
6 février.	1,13	2,15	1,52	0,34	764,1	N.-O. très-faible.	—
21 id.	1,16	1,80	1,32	0,31	757,8	N.-N.-O. id.	—
29 mars.	1,30	1.30	1,40	0,22	760,1	id. id.	—
15 avril.	1,34	1,22	1,43	0,26	763,5	N. faible.	—
5 mai.	1,51	1,13	1,57	0,54	758,9	N.-E. faible.	—
8 id.	1,25	1,12	1,30	0,40	761,6	S.-E. faible.	—
9 id.	1,24	1,12	1,29	0,49	761,0	id. id	—
13 id.	1,19	1,11	1,22	0,25	768,6	E.-N.-E. assez fort.	—
14 id.	1,20	1,11	1,25	0,32	763,6	N.-E. faible.	—
15 id.	1,20	1,11	1,24	0,46	762,2	E. assez fort.	—
20 id.	1,28	1,10	1,31	0,43	759,1	N.-O. faible.	—
22 id.	1,25	1,10	1,28	0,47	760,3	S. faible.	—
6 juillet.	1,23	1,08	1,26	0,52	761,7	N.-N.-E. faible.	—
10 id.	1,28	1,09	1,31	0,39	759,6	N.-O. fort.	—
4 septemb.	1,17	1,25	1,29	0,40	760,2	N.-O. léger.	
6 id.	1,15	1,27	1,35	0,41	764,5	id. id.	Gignac, à la campagne.
7 id.	1,17	1,28	1,27	0,43	763,2	id. id.	
5 octobre.	1,27	1,58	1,37	0,64	763,5	O. faible.	Palav., au bord de la mer
16 id.	1,25	1,70	1,49	0,37	751,3	N.-O. fort.	
22 id.	1,25	1,80	1,49	0,57	752,5	O.-S.-O. faible.	Montpellier, près du
24 id.	1,26	1,86	1,50	0,60	754,0	N.-O. fort.	Jardin des Plantes.
25 id.	1.33	1,89	1,58	0,78	759,1	N. faible.	
16 novemb.	1,15	2,40	»	0,67	»	N.-E. faible.	Palavas.
9 décembre.	1,24	2,80	»	0,92	762,5	N.-O léger.	
13 id.	1,31	2,84	»	0,35	762,0	O. léger.	Montpellier, près du
31 id.	1,15	2,83	»	0,93	765,7	O. léger.	Jardin des Plantes.

L'examen de ce tableau et celui de la courbe qui le représente conduit aux conséquences suivantes :

1° Il y a une certaine analogie entre les variations annuelles et les variations diurnes. Ainsi, de même que la courbe des variations diurnes n'est pas symétrique par rapport au midi vrai, et présente un maximum avant ce moment, de même dans le courant de l'année la radiation a ses plus grandes valeurs du 31 décembre au 21 juin. La courbe qui représente ces variations est plus élevée pendant la première moitié de l'année que pendant la seconde, et le maximum est atteint avant le 21 juin, époque du solstice d'été.

Dans le courant du mois de juillet, l'intensité a été inférieure à celle qui a été mesurée à la fin de mars et au commencement d'avril, quoique au mois de juillet la hauteur du soleil fût bien plus grande ; de plus, dans le courant du mois de septembre, la radiation avait à peu près la même valeur que vers la fin de février.

2° La radiation augmente rapidement du commencement de janvier au commencement de mai, où elle a atteint son maximum. Les plus fortes intensités sont comprises dans une période qui commence à la fin de mars pour finir au commencement de mai ; l'intensité diminue beaucoup en été.

3° On remarque dans le courant de cette année quatre périodes remarquables : la première commence à la fin de mars et finit au commencement de mai, où la radiation atteint les valeurs les plus hautes de l'année ; elle coïncide avec la reprise de l'activité des phénomènes de la végétation.

La seconde, du 5 au 20 mai, est caractérisée par un affaiblissement très-brusque de l'intensité de la radiation ; elle correspond à la période bien connue de refroidissement de la première quinzaine de mai, qui coïncide avec celle des *Saints de glace*.

La troisième, celle du commencement de septembre, correspond à des valeurs très-faibles de la radiation, quoique le ciel ait été d'une grande pureté pendant les observations. Il est à remarquer que ces observations ont précédé immédiatement l'époque des pluies torrentielles du 11 au 14 septembre, qui occasionnèrent des pertes si considérables dans le département de l'Hérault.

La quatrième, du 5 au 25 octobre, est caractérisée par une augmentation

considérable de l'intensité de la radiation, qui durant cette période est supérieure à la moyenne du mois de mai.

4° Enfin, on remarquera qu'il n'existe aucune relation bien nette entre les valeurs de la radiation et celles de l'état hygrométrique. En effet, l'état hygrométrique mesuré par nos instruments est celui de la couche d'air qui est en contact immédiat avec le sol et doit être très-différent de l'état moyen de la masse atmosphérique. Aussi la direction du vent nous donne-t-elle à cet égard des indications moins vagues, et l'on peut voir que l'intensité de la radiation est assez élevée par les vents du nord, du nord-ouest et du nord-est, qui nous amènent des courants froids et secs, tandis qu'elle faiblit visiblement par les vents du sud-est et du sud, qui sont chauds et humides. Ici, l'on retrouve d'une manière très-nette l'influence prépondérante de l'absorption exercée par la vapeur d'eau.

M. Desains[1] a mesuré à Paris l'intensité calorifique de la radiation solaire au moyen de son actinomètre thermo-électrique, et l'absorption T que subit cette radiation en traversant une couche d'eau distillée ayant une épaisseur constante et égale à 8 millimètres. Quelques-unes de ces observations ayant été faites en 1875, leur comparaison avec les miennes pourra présenter quelque intérêt.

OBSERVATIONS FAITES A MIDI VRAI EN 1874 ET 1875 à Paris.

DATES.	CALORIES.	T.	DATES.	CALORIES.	T.
30 Avril 1874	1,23	»	30 Janvier 1875	1,00	0,68
5 Juin —	1,10	0,66	18 Avril —	1,16	0,66
22 — —	1,29	0,70	20 — —	1,03	0,64
4 Juillet —	1,16	0,71	25 — —	1,22	0,63
6 — —	1,09	0,69			
24 Août —	1,15	0,69			

On voit que l'intensité de la radiation est toujours plus faible à Paris qu'à Montpellier, si l'on en excepte l'observation du 22 juin 1874, qui a

[1] *Compt. rend.*, tom. LXXX, pag. 1420 (juin 1875).

donné 1,29 à Paris, et à laquelle je ne puis comparer aucune observation faite à Montpellier dans le courant de ce mois.

On voit aussi que l'intensité de la radiation est assez forte à Paris pendant le mois d'avril. On ne peut pas expliquer la faiblesse relative des nombres obtenus par M. Desains par la plus grande épaisseur atmosphérique que les rayons doivent traverser à Paris, à cause de sa latitude plus élevée ; la véritable raison est l'absorption plus énergique exercée par une atmosphère plus humide, et par les fumées et les vapeurs qui se dégagent toujours des grandes villes.

D'après ce que nous avons dit de l'inégalité de l'absorption des radiations de diverses réfrangibilités, il est facile de voir que la grandeur des variations du coefficient de transmissibilité, lorsque l'épaisseur augmente, peut servir à mesurer les changements qu'éprouve la composition des radiations qui nous arrivent, la constitution atmosphérique restant constante. Les coefficients numériques de l'équation de la sous-tangente

$$S = c + mx$$

peuvent servir à caractériser ces changements. En effet, plus la valeur de m sera faible, plus la courbe des intensités calorifiques sera tendue, et plus elle se rapprochera d'une logarithmique ; c'est en effet ce que l'on remarque dans les équations suivantes des courbes qui représentent les observations de Pouillet dont nous avons donné les tableaux pag. 62 à 64, si l'on compare ces coefficients aux valeurs correspondantes de la transmissibilité.

28 Juin 1837........	$S = 2,8 + 0,2\,x$.
27 Juillet 1837.......	$S = 2,0 + 0,7\,x$.
22 Septembre 1837...	$S = 2,1 + 0,6\,x$.
4 Mai 1838.........	$S = 3,4 + 0,2\,x$.
11 Mai —	$S = 2,1 + 0,9\,x$.

Dans les courbes qui représentent les résultats de mes observations, au contraire, les sous-tangentes varient plus rapidement, et les valeurs relativement grandes des coefficients m de x dans les équations des sous-tangentes sont une preuve certaine de changements plus considérables du coefficient de transmissibilité, et par conséquent de la composition des radiations qui parviennent à la surface du sol (Voir pag. 56 à 58).

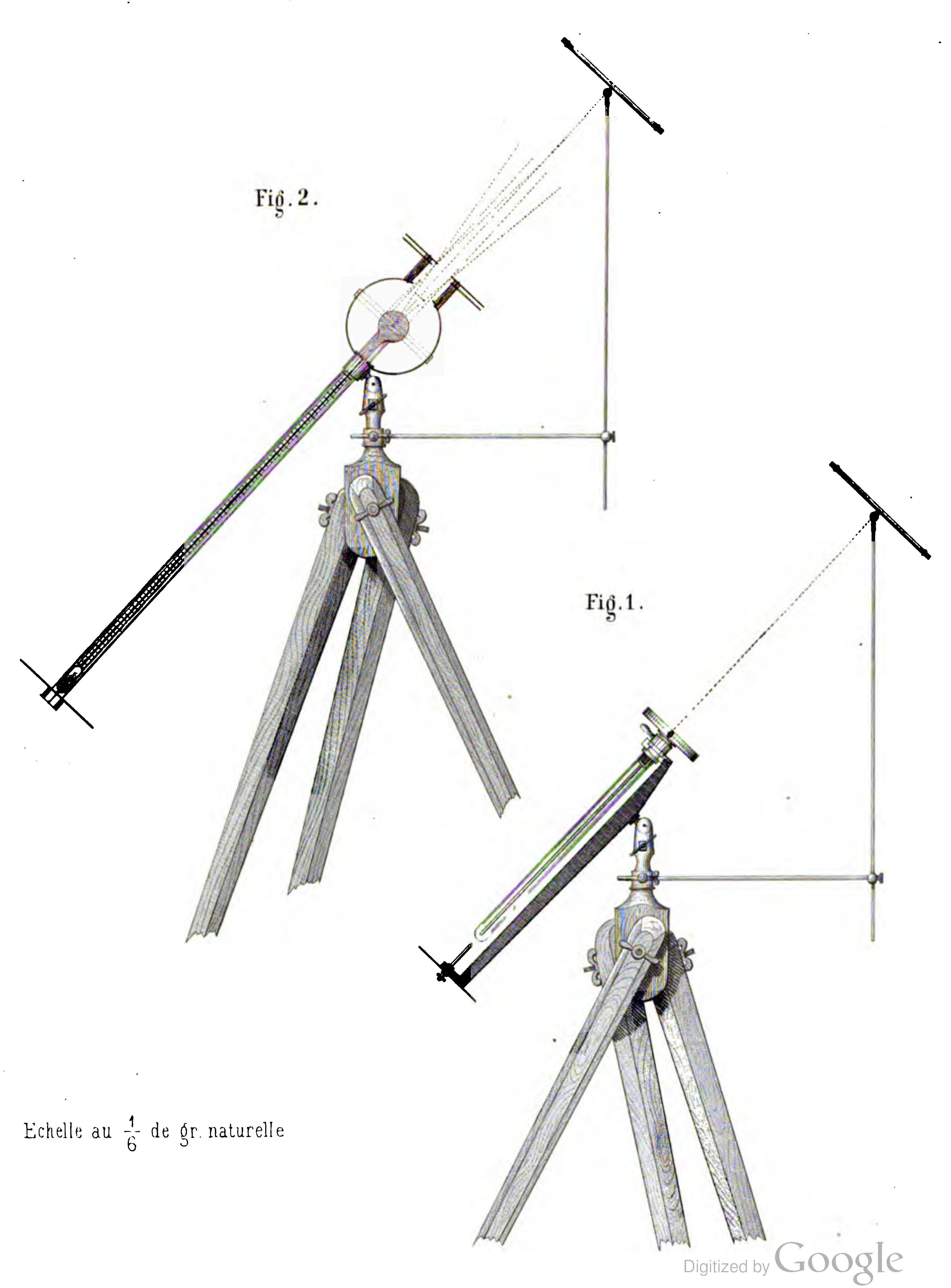
Cette particularité, ainsi que les valeurs relativement élevées de l'intensité de la radiation mesurées à Montpellier, sont une conséquence d'une transparence calorifique de l'atmosphère plus grande à Montpellier qu'à Paris.

Des déterminations plus nombreuses et faites dans des circonstances plus variées sont nécessaires pour qu'il soit possible d'établir avec quelque précision la nature de l'influence qu'exerce l'atmosphère en un point déterminé, sur l'intensité et la composition des radiations solaires. C'est dans ce sens que je poursuis les recherches dont je viens de donner un premier aperçu. La mesure de la transmissibilité des radiations à travers une épaisseur constante d'eau peut aussi donner des indications très-utiles, comme le montrent les résultats déjà obtenus par M. Desains et M. Soret.

Les déterminations que j'ai faites par cette méthode m'ont donné des résultats qui confirment les conclusions que j'ai tirées des différences de transmissibilité de la radiation solaire à travers des masses d'air variables ; elles seront résumées dans un autre travail.

Montpellier, 15 mai 1876.





Echelle au $\frac{1}{6}$ de gr. naturelle

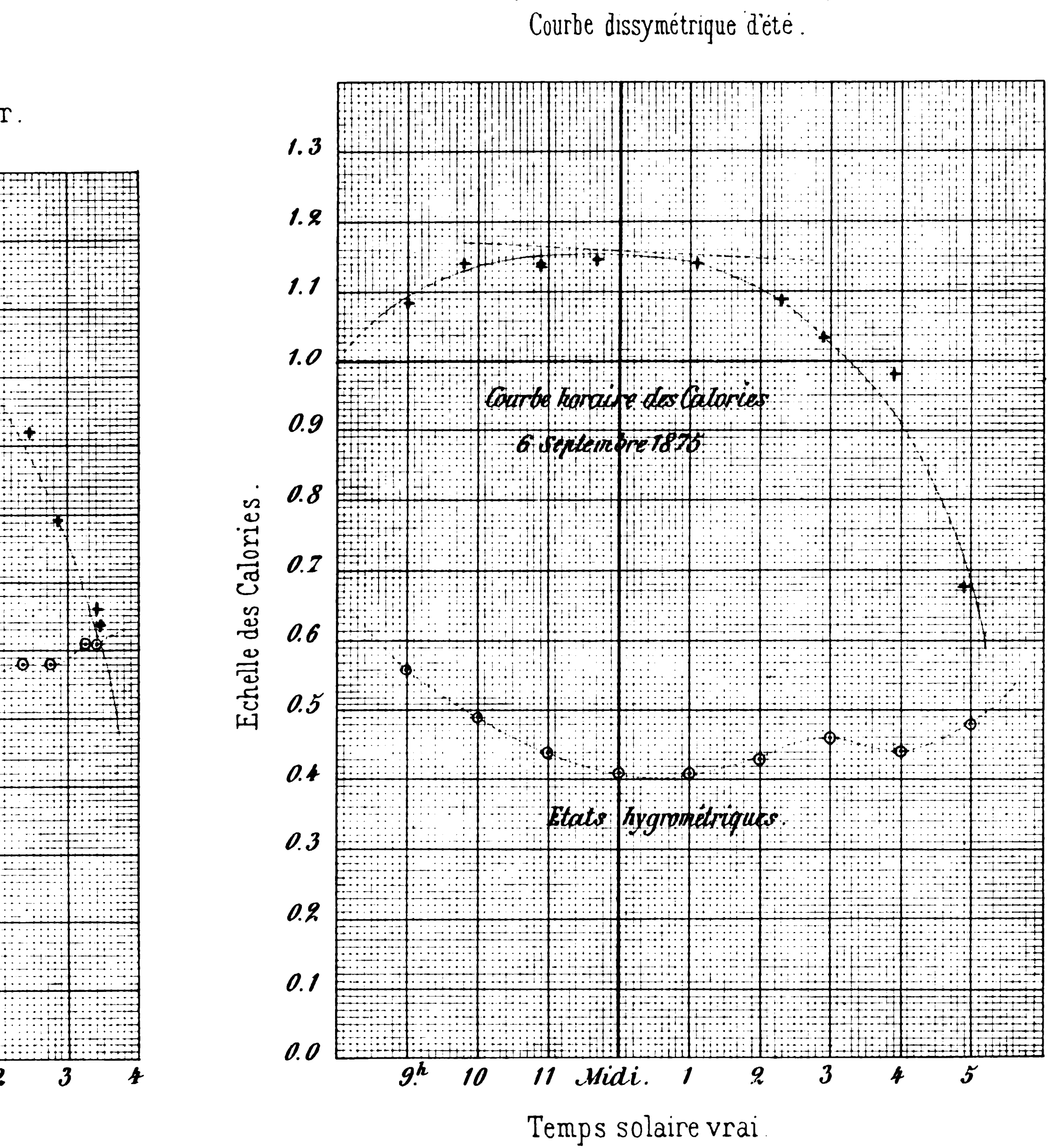
Fig. 1.

Courbe symétrique d'hiver.

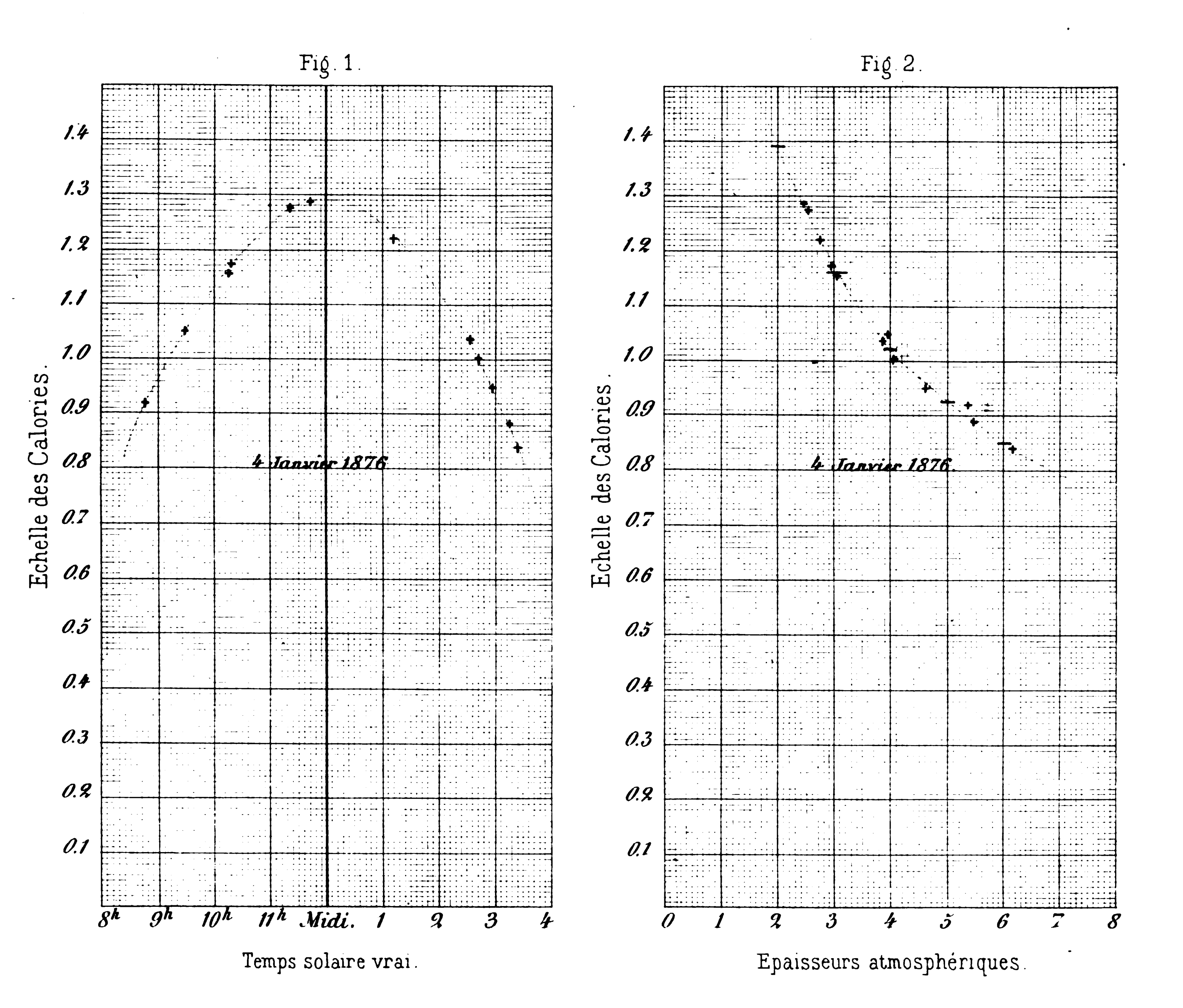
Courbe horaire des Calories
8 Janvier 1875.
Etats hygrométriques.
Echelle des Calories.
1.2
1.1
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
8h
9
10
11
Midi.
1
2
3
4
Temps solaire vrai.

Fig. 2.

Courbe dissymétrique d'été.



Lith. Boehm & Fils.



Lith. Boehm & Fils, Montp.






89074773847
b89074773847a
Digitized by Google